



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre : M...../GM/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Thème

**Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité
trapézoïdale munie d'ailettes**

Présenté par :

- ❖ Benabdeloued Mohamed El Amine
- ❖ Gottiche Mohammed

Soutenu le 24/ 06 / 2024 devant le jury composé de :

Président	Dr. GUERMAT Abdelkader	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. SAHRAOUI Nassim Mahfoud	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Pr. RETIEL Noureddine	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers Allah, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.

Ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien conscient de nombreuses personnes.

Ensuite, nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur, Pr. Retiel Noureddine, pour sa patience et ses précieux conseils qui ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail. En reconnaissance de son éminente personnalité, nous lui dédions ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à Monsieur Moussa Senouci pour ses précieux conseils dans la simulation numérique, qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Nous souhaitons également exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir de leurs précieuses suggestions.

Nous tenons à exprimer une gratitude sincère envers nos parents et nos famille. Leurs prières et leur encouragement nous ont aidé à surmonter tous les défis pour mener à bien ce travail. Leur soutien constant a été indispensable à notre réussite.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui ont joué un rôle, directement ou indirectement, dans notre formation et notre développement tout au long de ce parcours académique. Votre soutien précieux restera gravé dans nos mémoires et nous inspirera pour nos projets à venir.

Résumé

Cette étude vise à stocker l'énergie dans une cavité trapézoïdale munie d'ailettes. Elle est structurée en trois parties principales. La première partie consiste en une étude bibliographique et une modélisation mathématique. La deuxième partie comprend une étude numérique par simulation utilisant les logiciels Gambit et Fluent, où nous investiguons la convection naturelle dans une cavité trapézoïdale à l'aide de la méthode des volumes finis.

Dans la troisième partie, "Résultats et discussion", nous nous concentrons sur l'étude d'une cavité chauffée sur sa paroi gauche inclinée, tandis que la paroi droite reste froide. Les parois supérieure et inférieure sont adiabatiques, et nous utilisons de l'eau comme fluide caloporteur. Nous étudions l'impact du changement d'inclinaison de la paroi gauche sur les performances de transfert de chaleur. Nous comparons le transfert de chaleur avec et sans ailettes.

Nous validons également notre code de calcul en le comparant avec des résultats de référence dans la littérature.

Mots clés : convection naturelle, cavité trapézoïdal, ailettes, stockage d'énergie

Abstract

The aims of this study is to store energy in a trapezoidal cavity equipped with fins. It is structured into three main parts. The first part consists of a literature review and mathematical modeling. The second part includes a numerical study through simulation using the software Gambit and Fluent, where we investigated natural convection in a trapezoidal cavity using the finite volume method.

In the third part, "Results and Discussion," we focus on studying a cavity heated on its inclined left wall, while the right wall remains cold. The top and bottom walls are adiabatic, and we use water as the heat transfer fluid. We study the impact of changing the inclination of the left wall on heat transfer performance. We compare heat transfer with and without fins. We also validate our computational code by comparing it with reference results in the literature.

Keywords: natural convection, trapezoidal cavity, fins, energy storage

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تخزين الطاقة في تجويف شبه منحرف مزود بزعانف. وهي مكونة من ثلاثة أجزاء رئيسية الجزء الأول يتضمن دراسة ببيولوجرافية ونمذجة رياضية. الجزء الثاني يشمل دراسة رقمية عن طريق المحاكاة باستخدام برامج Gambit وFluent ، حيث نحقق في الحمل الحراري الطبيعي في تجويف شبه منحرف باستخدام طريقة الحجم المحدود

في الجزء الثالث، "النتائج والمناقشة"، نركز على دراسة تجويف مسخن على جداره الأيسر المائل، بينما يبقى الجدار الأيمن بارداً. الجدران العلوية والسفلية مقاومة للحرارة، ونستخدم الماء كسائل ناقل للحرارة. ندرس تأثير تغيير ميل الجدار الأيسر على أداء نقل الحرارة. نقارن نقل الحرارة مع وبدون الزعانف.

كما نقوم أيضاً بالتحقق من صحة كود الحساب الخاص بنا من خلال مقارنته بنتائج مرجعية في الأدبيات.

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي، تجويف شبه منحرف، زعانف، تخزين الطاقة

Sommaire

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale

Chapitre 1 Etude bibliographique et modélisation mathématique..... 4

1.1 Introduction 4

1.2 Définition Stockage de l'énergie avec le solaire..... 4

1.3 Types de stockage d'énergie solaire 4

a) Stockage thermique 4

b) Stockage électrique 4

1.4 Les Avantages du stockage d'énergie solaire 4

a) Augmentation de l'autoconsommation :..... 4

b) Autonomie énergétique accrue : 4

c) Stabilisation du réseau électrique :..... 4

d) Développement des énergies renouvelables : 5

1.5 Inconvénients du stockage d'énergie solaire 5

a) Coût élevé : 5

b) Efficacité limitée :..... 5

c) Impact environnemental :..... 5

1.6 Types de Stockage d'Énergie Thermique 5

a) Stockage d'énergie par chaleur sensible :..... 5

b) Stockage d'énergie par chaleur latente 5

1.7 Diagramme des changements d'état de la matière.....	5
1.8 Les capteurs d'énergie solaire	6
1.9 Les ailettes.....	6
1.10 L'efficacité d'une ailette.....	6
a) La conductivité thermique du matériau de l'ailette	6
b) La géométrie de l'ailette	6
c) Les propriétés du fluide environnant.....	6
1.11 Le transfert de chaleur	6
1.12 Les Modes de transfert de chaleur.....	6
a) Conduction	6
b) Convection	7
c) Rayonnement.....	7
1.13 Les types de convection	7
a) La convection naturelle	7
b) La convection forcée.....	7
1.14 Description du problème et hypothèses	7
a) Le modèle physique du problème	7
b) Hypothèses simplificatrices	8
c) Conditions aux limites.....	8
d) Formulation mathématique du problème	8
e) Mise sous forme adimensionnelle	9
1.15 Approximation de Boussinesq	10
Conditions d'utilisation de l'approximation de Boussinesq.....	10
1.16 Nombres adimensionnels	10
a) Nombre de Rayleigh	10
b) Nombre de Prandtl	10
a) Le nombre de Grashof.....	11

b) Le nombre de Nusselt	11
1.17 Conclusion.....	12
chapitre 2 Méthode de résolution numérique.....	14
2.1 Introduction	14
2.2 Méthodes des volumes finis	14
2.3 Description du logiciel Gambit	14
2.4 Interface et étapes de Gambit	15
a) Lancer Gambit.....	15
b) Construction de la géométrie	15
c) Génération de maillage.....	16
d) Les conditions aux limites	16
e) Exportation du maillage de Gambit	17
2.5 Le solveur fluent.....	18
a) Définition de fluent	18
b) Les étapes de solveur fluent	18
2.5.b.1 Lancer Fluent.....	18
2.5.b.2 Importation de la géométrie	18
2.5.b.3 Vérification du maillage.....	19
2.5.b.4 Vérification des unités et des dimensions	19
c) Définition du modèle.....	20
2.5.c.1 Choix du solveur.....	20
2.5.c.2 Choix du régime d'écoulement :	21
d) Définition du matériel	21
2.5.d.1 Les caractéristiques du matériau	21
2.5.d.2 Les conditions opératoires.....	22
2.5.d.3 Les conditions aux limites.....	22
e) Le solveur.....	23

2.5.e.1 Contrôle de la solution :	23
2.5.e.2 Initialisation.....	23
2.5.e.3 Choix des critères de convergence :	24
2.5.e.4 Lancement du calcul de convergence :.....	24
2.5.e.5 Allures de l'évolution des résidus de calcul :	25
2.6 Conclusion.....	25
3 Résultats et discussion.....	27
3.1 Introduction	27
3.2 Validation du Calcul.....	28
a) Test du maillage (degré 45°).....	28
b) Validation du code de calcul.....	29
3.2.b.1 Les propriétés de l'air	29
3.2.b.2 Validation quantitative	29
3.3 Résultats et discussions	30
a) Étude de l'influence du nombre de Rayleigh à 45°	30
3.3.a.1 Les propriétés de l'eau.....	30
3.3.a.2 Lignes Isothermes.....	31
3.3.a.3 Lignes de Courant.....	32
b) Étude de l'effet de l'inclinaison à 45°, 30° et 60°	34
3.3.b.1 Lignes Isothermes	34
3.3.b.2 Lignes de Courant	35
c) Effet des ailettes sur le transfert de chaleur.	38
3.3.c.1 La distribution de températures	38
3.3.c.2 Lignes de Courant.....	39
3.4 Conclusion.....	40
Conclusion Générale	41
Bibliographie.....	43

Listes des figures

Figure 1.1: Configuration chaleur sensible et latente de l'eau [19]	5
---	---

Nomenclature

A : longueur d'ailette	[m]
B : Épaisseur de l'Ailette	[m]
Cp : Chaleur spécifique à pression constante	[J/(kg.K)]
g L'accélération de pesanteur	[m/s ²]
H : La hauteur de la cavité	[m]
h : coefficient de transfert de chaleur par convection	[W/m ² .K]
L : Longueur de la cavité	[m]
l: longueur de la paroi supérieure de cavité	[m]
T : Température	[°C]
T _c : Température chaud	[°C]
T _f : Température froid	[°C]
T _{moy} : Température moyenne	[°C]
U Composante adimensionnelle de vitesse suivant X	[]
U Vitesse suivant x	[m/s]
V Composante adimensionnelle de vitesse suivant Y	[]
v Vitesse suivant y	[m/s]
x, y : Coordonné cartésienne	[m]
X, Y : Coordonnées adimensionnelle (x/L ; y/L).	[]
ρ :Masse volumique	[kg/m ³]
μ Viscosité dynamique	[kg/m.s]
ν Viscosité cinématique	[m ² /s]
ΔT La différence de température	[°C]
λ : La conductivité thermique	[W/(m.K)]

α La diffusivité thermique [m²/s]

β Coefficient de dilatation thermique volumétrique [K⁻¹]

γ angle d'inclinaison [°]

Nombres adimensionnels

Gr Nombre de Grashof

Nu Nombre de Nusselt

Pr Nombre de Prandtl

Ra Nombre de de Rayleigh

Introduction générale

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, cette expression désigne également le stockage de matière contenant de l'énergie. Ce sujet est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Le stockage de l'énergie permet d'ajuster la production et la consommation d'énergie en limitant les pertes. Ainsi, l'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée lorsque la demande est plus importante. Face à l'intermittence ou à la fluctuation de la production de certaines énergies, notamment renouvelables, cette opération permet de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage varient en fonction du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. En revanche, le stockage est plus complexe pour les énergies intermittentes : leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage.

Une des méthodes de stockage est le stockage par chaleur sensible. Ce procédé consiste à élever la température d'un matériau pour stocker de l'énergie. C'est notamment le principe des chauffe-eau solaires, qui récupèrent la chaleur pendant la journée pour la restituer ensuite, avec un rendement moyen d'environ 40% pour les systèmes les plus récents. Les matériaux privilégiés pour ce type de stockage sont l'eau, l'huile de synthèse, la roche ou encore le béton. Pour de grands volumes, la chaleur captée par des capteurs solaires ou des rejets industriels peut être stockée dans le sous-sol. Le stockage géologique, pouvant être couplé à des opérations de géothermie, est encore assez peu répandu.

L'énergie solaire offre une solution durable et prometteuse pour répondre à nos besoins énergétiques tout en préservant notre environnement. Le solaire thermique, en particulier, se distingue par sa capacité à capter la chaleur du soleil et à la stocker efficacement pour une utilisation ultérieure. Une méthode de stockage prometteuse repose sur l'utilisation de l'eau et de la convection naturelle.

L'idée est simple : en chauffant de l'eau à l'aide de panneaux solaires, nous pouvons stocker cette chaleur pour l'utiliser lorsque c'est nécessaire. Ce processus repose sur la chaleur sensible, qui modifie la température de l'eau sans changer son état physique. Par exemple, pour chauffer un litre d'eau de 0°C à 100°C, il faut fournir une quantité d'énergie spécifique, démontrant ainsi le potentiel de stockage de chaleur dans l'eau.

Cette approche présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle exploite une ressource abondante et gratuite : le soleil. Ensuite, elle réduit notre dépendance aux énergies fossiles polluantes et contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. De plus, les installations de chauffe-eau solaires sont bien adaptées à un usage individuel, offrant une solution pratique et fiable pour répondre à une part importante de nos besoins en chaleur.

En outre, le stockage de l'énergie thermique dans l'eau peut être réalisé à grande échelle, avec des applications variées telles que le chauffage domestique, industriel ou même le stockage géothermique. En utilisant des matériaux tels que l'eau, l'huile de synthèse, la roche ou le béton, nous pouvons stocker efficacement la chaleur captée pendant la journée pour la restituer ensuite, contribuant ainsi à l'optimisation de nos ressources énergétiques et à la réduction des pertes.

En conclusion, le stockage de l'énergie thermique avec l'eau et la convection naturelle offre une solution durable et prometteuse pour répondre à nos besoins énergétiques tout en préservant notre planète. En exploitant efficacement le potentiel du soleil, nous pouvons créer un avenir énergétique plus propre et plus durable pour les générations à venir.

Chapitre 1

Etude bibliographique et modélisation mathématique

1 Etude bibliographique et modélisation mathématique

1.1 Introduction

Dans cette première section, nous présenterons quelques revues bibliographiques et des définitions pertinentes. Nous introduirons également le problème physique étudié et la configuration géométrique retenue dans ce mémoire. De plus, nous décrirons les hypothèses simplificatrices utilisées pour réduire les équations générales. Ces hypothèses incluront l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie, ainsi que les conditions aux limites appliquées à la configuration géométrique étudiée.

1.2 Définition Stockage de l'énergie avec le solaire

Le stockage d'énergie solaire consiste à conserver l'énergie excédentaire produite par des panneaux solaires pour une utilisation ultérieure. Cela permet de bénéficier de l'énergie solaire même en l'absence de soleil, ce qui est crucial pour les applications hors réseau et pour chauffer l'eau grâce à l'énergie solaire. [13] [18]

1.3 Types de stockage d'énergie solaire

Il existe deux principaux types de stockage d'énergie solaire : [18] [21]

a) Stockage thermique

L'énergie solaire est utilisée pour chauffer un fluide, qui est ensuite stocké dans un réservoir. La chaleur emmagasinée peut ensuite servir à fournir de la chaleur domestique.

b) Stockage électrique

L'énergie solaire est convertie en électricité, puis stockée dans des batteries. Cette électricité peut ensuite être utilisée pour alimenter des appareils électriques ou être injectée dans le réseau électrique.

1.4 Les Avantages du stockage d'énergie solaire

- a) **Augmentation de l'autoconsommation** : Le stockage d'énergie solaire permet aux particuliers et aux entreprises de consommer davantage l'énergie qu'ils produisent, réduisant ainsi leur dépendance au réseau électrique. [18]
- b) **Autonomie énergétique accrue** : Le stockage d'énergie solaire peut fournir une alimentation de secours en cas de panne de courant. [18]
- c) **Stabilisation du réseau électrique** : Le stockage d'énergie solaire aide à lisser la production d'électricité sur les réseaux, réduisant les coûts et améliorant la fiabilité. [18]

d) **Développement des énergies renouvelables** : Le stockage d'énergie solaire est essentiel pour le développement des énergies renouvelables, car il permet de surmonter l'intermittence de ces sources d'énergie. [18]

1.5 Inconvénients du stockage d'énergie solaire

a) **Coût élevé** : Les systèmes de stockage d'énergie solaire sont encore relativement coûteux, ce qui peut freiner leur adoption. [21]

b) **Efficacité limitée** : Les systèmes de stockage d'énergie solaire ne sont pas totalement efficaces, ce qui signifie qu'une partie de l'énergie est perdue pendant le processus de stockage et de restitution. [18]

c) **Impact environnemental** : La fabrication et le recyclage des batteries peuvent avoir un impact environnemental. [18]

1.6 Types de Stockage d'Énergie Thermique

a) **Stockage d'énergie par chaleur sensible** :

Ce type de stockage utilise la capacité d'un matériau à augmenter sa température pour emmagasiner de l'énergie. L'énergie est conservée sous forme de chaleur dans le matériau, et la quantité d'énergie stockée dépend de la masse du matériau et de l'augmentation de sa température. [10] [11]

b) **Stockage d'énergie par chaleur latente**

Ce type de stockage repose sur la capacité d'un matériau à changer de phase, par exemple de solide à liquide, pour emmagasiner de l'énergie. L'énergie est absorbée ou libérée lors du changement de phase, et la quantité d'énergie stockée est fonction de la masse du matériau et de la chaleur latente de fusion du matériau. [4] [7]

1.7 Diagramme des changements d'état de la matière

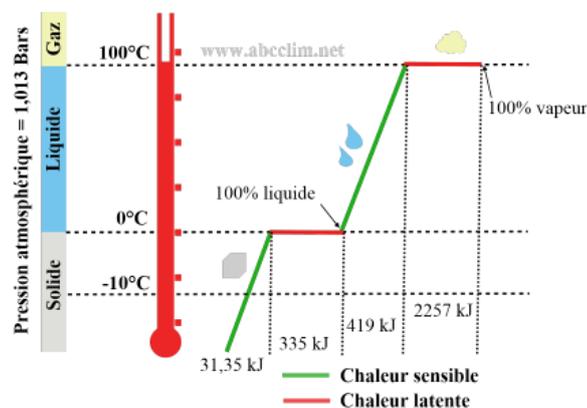


Figure 1.1: Configuration chaleur sensible et latente de l'eau [19]

1.8 Les capteurs d'énergie solaire

Un capteur solaire, aussi appelé panneau solaire thermique ou collecteur solaire, est un dispositif conçu pour capter l'énergie du soleil et la convertir en chaleur. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour chauffer de l'eau, des bâtiments ou d'autres applications.

Les capteurs solaires sont généralement composés d'un absorbeur, une surface sombre qui capte le rayonnement solaire, et d'un isolant, qui empêche la chaleur de s'échapper. L'absorbeur est souvent recouvert d'un revêtement sélectif, optimisant ainsi l'absorption du rayonnement solaire tout en minimisant les pertes de chaleur. [3] [17]

1.9 Les ailettes

Une ailette est un élément thermique conçu pour améliorer le transfert de chaleur entre un solide et le fluide environnant. Fabriquée généralement à partir de matériaux conducteurs de chaleur tels que l'aluminium ou le cuivre, elle se caractérise par une forme allongée et fine [2] [8]

1.10 L'efficacité d'une ailette

L'efficacité d'une ailette dépend de plusieurs facteurs, notamment: [2] [16]

a) La conductivité thermique du matériau de l'ailette

Un matériau à haute conductivité thermique facilite un transfert de chaleur plus performant.

b) La géométrie de l'ailette

La forme et la taille de l'ailette influent sur la surface d'échange thermique et la résistance à la convection.

c) Les propriétés du fluide environnant

La conductivité thermique et la vitesse du fluide affectent le transfert de chaleur par convection.

1.11 Le transfert de chaleur

Le transfert de chaleur désigne le processus par lequel l'énergie interne passe d'un système à un autre lorsque ces derniers ne sont pas en équilibre thermodynamique. C'est un phénomène essentiel dans divers domaines de la science et de l'ingénierie.

En termes simples, le transfert de chaleur consiste à ce que la chaleur se déplace d'un objet chaud vers un objet plus froid. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que les deux objets atteignent la même température, signifiant qu'ils sont en équilibre thermique. [9] [12] [16]

1.12 Les Modes de transfert de chaleur

Il y a trois principaux modes de transfert de chaleur: [9] [12] [16]

a) Conduction

La conduction est le transfert de chaleur qui se produit entre deux objets en contact direct. L'énergie thermique se transmet par les vibrations des atomes et des molécules dans les

matériaux. Plus le matériau est bon conducteur, plus la chaleur se transfère rapidement.

b) Convection

La convection se produit entre un objet et un fluide environnant (comme un liquide ou un gaz). Dans ce mode, le fluide chaud monte tandis que le fluide froid descend, créant ainsi des courants qui transportent la chaleur.

c) Rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur par l'émission d'ondes électromagnétiques. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement ne nécessite pas de milieu pour se propager. C'est grâce à ce mode de transfert que nous recevons la chaleur du soleil

1.13 Les types de convection

a) La convection naturelle

La convection naturelle ou convection libre, est un type de transfert de chaleur qui se produit lorsque le fluide se déplace uniquement à cause des différences de température entre ses différentes parties. [1] [5]

b) La convection forcée

La convection forcée en revanche, est un type de transfert de chaleur où le fluide est mis en mouvement par une force externe, comme un ventilateur ou une pompe. [1] [5]

1.14 Description du problème et hypothèses

a) Le modèle physique du problème

Le problème physique concerne une cavité trapézoïdale. La longueur de la paroi supérieure horizontale est l , celle de la paroi inférieure horizontale est L et la hauteur de la paroi verticale est H . L'angle d'inclinaison γ de la paroi chaude peut être égal à 30° , 45° ou 60° selon le cas.

La paroi verticale est froide à la température T_f et la paroi inclinée est chaude à la température T_c . Les autres parois horizontales étant adiabatiques, cela génère un gradient de température horizontale.

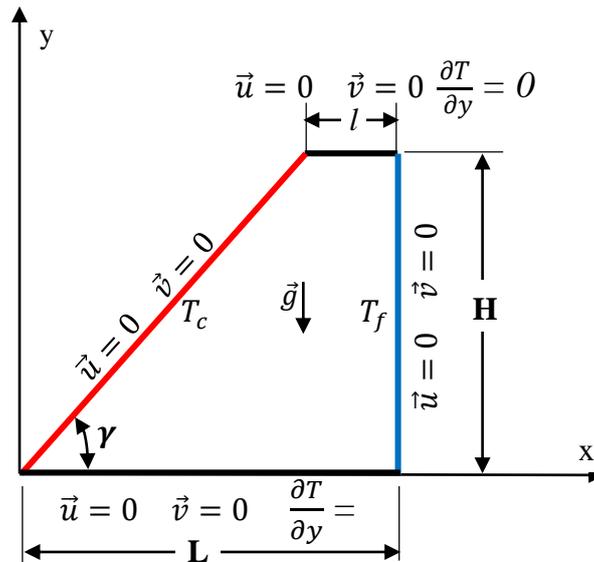


Figure I.2 Le modèle physique

b) Hypothèses simplificatrices

Afin d'établir un modèle mathématique simple du problème, nous avons adopté les hypothèses suivantes :

- Écoulement est permanent
- Le fluide est incompressible
- Le régime de l'écoulement du fluide au sein de la cavité est laminaire.
- Les propriétés physiques (ρ, μ, k) de l'écoulement sont constantes.
- L'approximation de Boussinesq est prise en compte. Elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables au niveau de tous les termes des équations de quantité de mouvement (sauf au niveau du terme de gravité).
- L'écoulement est considéré bidimensionnel.

c) Conditions aux limites

Les conditions aux limites relatives à ce problème exprimées de manière dimensionnelle

Paroi verticale :	$x=L$	$0 < y < H$	$\Rightarrow T=T_f$	$\vec{u} = 0, \vec{v} = 0$
Paroi horizontale inférieure	$0 < x < L$	$y=0$	$\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0$	$\vec{u} = 0, \vec{v} = 0$
Paroi horizontale supérieure	$L-l < x < L$	$y=H$	$\Rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0$	$\vec{u} = 0, \vec{v} = 0$
Paroi inclinée	$0 < x < L-l$	$0 < y < H$	$\Rightarrow T=T_c$	$\vec{u} = 0, \vec{v} = 0$

d) Formulation mathématique du problème

1) Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

2) Equation de quantité de mouvement

suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_f)$$

3) Equation de l'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

e) Mise sous forme adimensionnelle

Les variables adimensionnelles suivantes ont été utilisées :

$$X = \frac{x}{H} ; Y = \frac{y}{H} ; U = \frac{u}{\alpha/H} ; V = \frac{v}{\alpha/H} ; \theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f} ; P = \frac{\rho H^2}{\rho \alpha^2}$$

Nous obtenons les équations suivantes :

1) Equation de Continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

2) Equation de quantité de mouvement

Suivant X :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right)$$

Suivant Y :

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \text{RaPr}\theta$$

3) Equation de l'énergie :

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right)$$

Avec :

$$\text{Ra} = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha \nu} ; \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$$

1.15 Approximation de Boussinesq

L'approximation de Boussinesq est une simplification utilisée en mécanique des fluides pour étudier les écoulements de convection naturelle, lorsque les variations de densité sont faibles par rapport à la densité moyenne du fluide. Cette approximation permet de linéariser les équations de Navier-Stokes, ce qui simplifie leur résolution. [21]

Conditions d'utilisation de l'approximation de Boussinesq

- Les variations de température doivent être faibles par rapport à la température moyenne.
- Les changements de densité doivent être proportionnels aux variations de température.
- Les effets de la compressibilité doivent être négligeables.

1.16 Nombres adimensionnels

a) Nombre de Rayleigh

Le nombre de Rayleigh (Ra) est une grandeur sans dimension, nommée en l'honneur de Lord Rayleigh. Il est étroitement lié au nombre de Grashof (Gr), et ces deux nombres sont utilisés pour caractériser la convection naturelle ainsi que le transfert de chaleur par convection naturelle. Le nombre de Rayleigh est défini comme le produit du nombre de Grashof, qui exprime la relation entre la force de flottabilité et les forces de frottement dû à la viscosité dans un fluide, et le nombre de Prandtl, qui exprime le rapport entre la diffusivité visqueuse et la diffusivité thermique.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_c - T_f)H^3}{\alpha \nu}$$

b) Nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl est une grandeur sans dimension, qui contribue à la compréhension de la couche limite. Il est défini comme le rapport entre la diffusivité visqueuse et la diffusivité thermique d'un fluide. La diffusivité visqueuse, exprime la résistance du fluide aux contraintes de cisaillement, aux différentes couches du fluide se déplaçant à des vitesses différentes, souvent dues à des vitesses distinctes des parois adjacentes, et cela en relation avec la masse volumique.

$$Pr = \frac{\rho c_p \nu}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha} \quad \text{avec } \alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

a) Le nombre de Grashof

Le nombre de Grashof (Gr) est un nombre sans dimension utilisé en transfert de chaleur pour évaluer l'importance des forces de flottabilité par rapport aux forces de frottement dû à la viscosité du fluide.

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2}$$

b) Le nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt (Nu) est un nombre sans dimension employé en mécanique des fluides pour caractériser le transfert de chaleur par convection entre un fluide et une surface. Il compare le transfert de chaleur par convection à celui par conduction. Plus ce nombre est élevé, plus la convection domine sur la conduction.

$$Nu = \frac{hH}{\lambda}$$

1.17 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une revue bibliographique sur le problème de la convection naturelle dans une cavité trapézoïdale rempli d'eau et soumise à un gradient de température horizontal. Nous avons présenté la configuration physique étudiée, ainsi que les hypothèses et les équations correspondantes. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la méthode de résolution et les outils numériques utilisés dans cette étude.

Chapitre 2

Méthode de résolution numérique

2 Méthode de résolution numérique

2.1 Introduction

La résolution des équations de conservation est essentielle dans la modélisation et la simulation de nombreux domaines scientifiques et techniques. Ces équations permettent de décrire la conservation de quantités physiques telles que la masse, l'énergie et la quantité de mouvement dans un système donné. En les résolvant, on peut comprendre et anticiper le comportement des fluides, des particules, des polluants, ainsi que de nombreux autres phénomènes physiques.

Dans cette recherche, nous avons choisi d'utiliser une approche numérique avec le logiciel FLUENT, qui utilise la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations principales.

2.2 Méthodes des volumes finis

Le principe de cette méthode repose sur une technique de discrétisation qui transforme les équations aux dérivées partielles en équations algébriques pouvant être résolues numériquement. Le domaine de calcul est subdivisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. Chacun de ces volumes englobe un nœud principal, La technique des volumes de contrôle implique l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle, permettant ainsi d'obtenir des équations discrétisées qui préservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle.

2.3 Description du logiciel Gambit

Le logiciel Gambit (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit) est un préprocesseur de maillage 2D/3D utilisé pour générer des maillages pour des problèmes de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il permet de mailler des domaines géométriques pour des simulations numériques. Gambit offre la possibilité de créer des maillages structurés ou non structurés en utilisant des coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il est capable de générer des maillages complexes en deux ou trois dimensions, avec des éléments de type rectangle ou triangle.

Les options de génération de maillage de Gambit offrent une grande flexibilité. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour créer un maillage structuré. Alternativement, Gambit peut générer automatiquement un maillage non structuré adapté à la géométrie construite. Les outils de vérification du maillage intégrés permettent de détecter facilement les défauts éventuels.

2.4 Interface et étapes de Gambit

a) Lancer Gambit

Après lancement du le logiciel, l'interface d'utilisation :

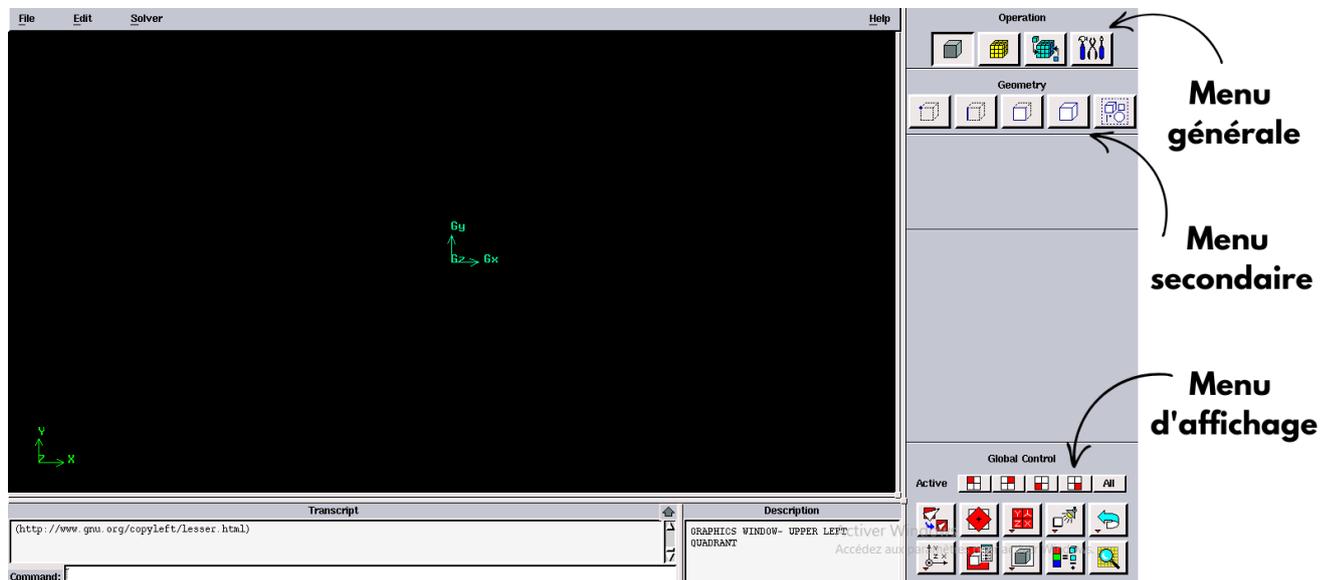


Figure 2.1 Interface de GAMBIT

b) Construction de la géométrie

Dans notre processus de création de la géométrie 2D dans Gambit, nous avons suivi une approche méthodique : nous avons défini point par point, puis lié avec des arêtes. Ensuite, nous avons créé les faces nécessaires pour obtenir la géométrie souhaitée

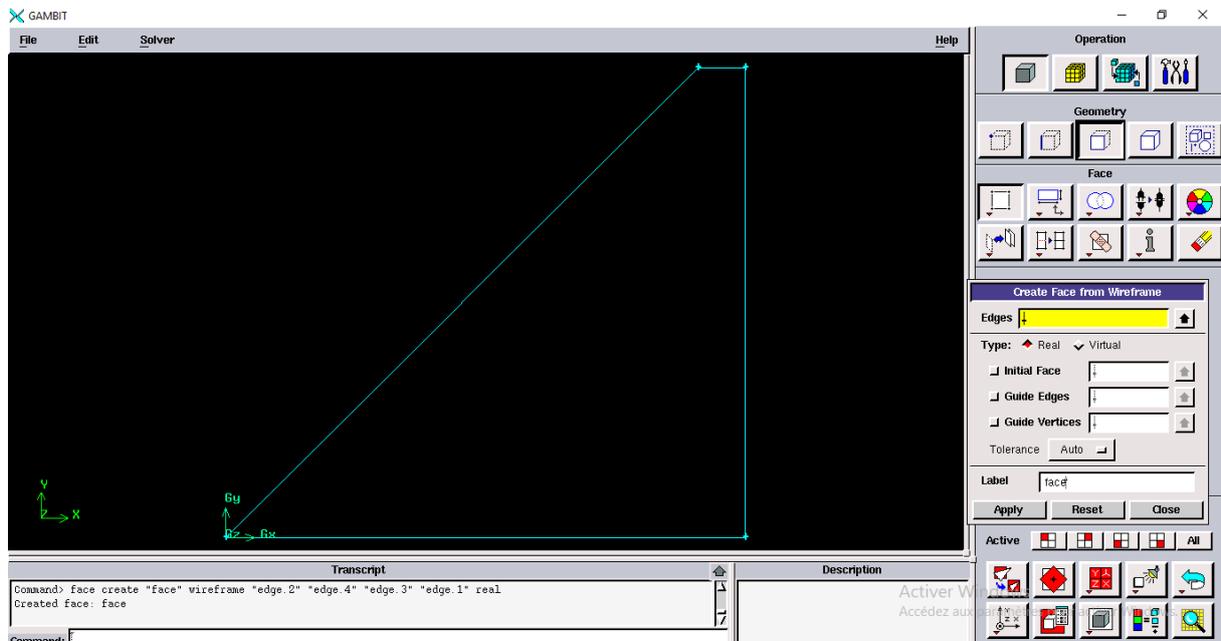


Figure 2.2 Construction de la géométrie

c) Génération de maillage

Dans notre cas d'étude, nous avons suivi la méthode du maillage en triangles avec 110 nœuds sur les parois gauche et droite pour la température, et 60 nœuds sur les parois supérieure et inférieure.

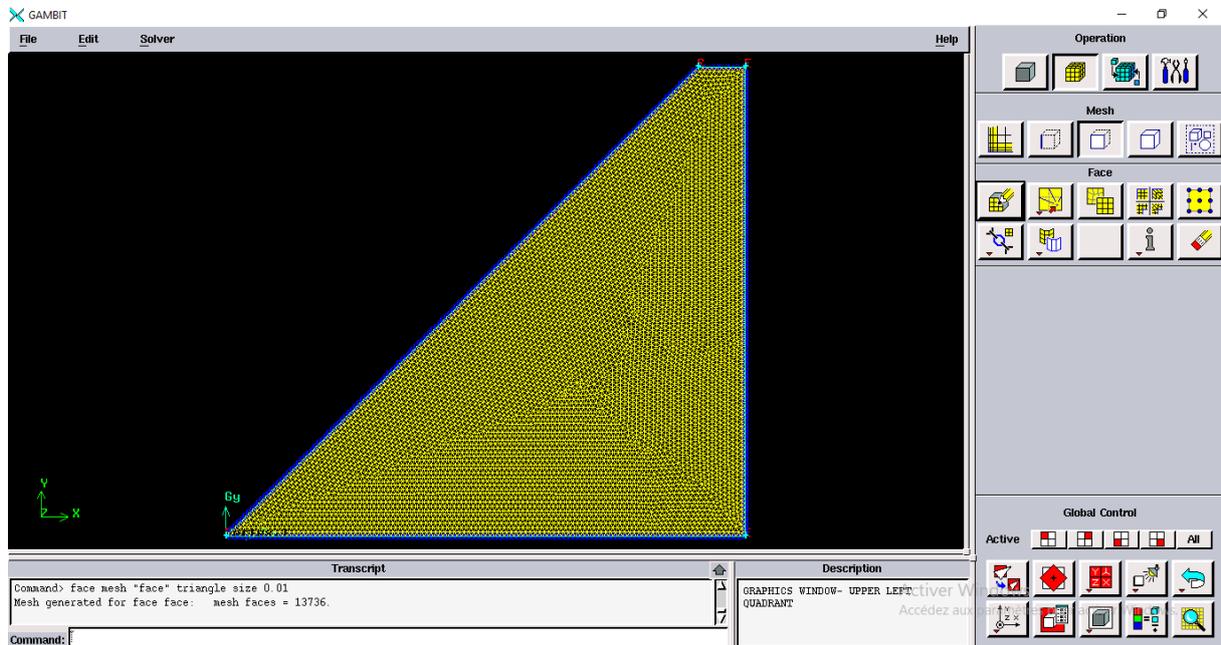


Figure 2.3 Génération de maillage

d) Les conditions aux limites

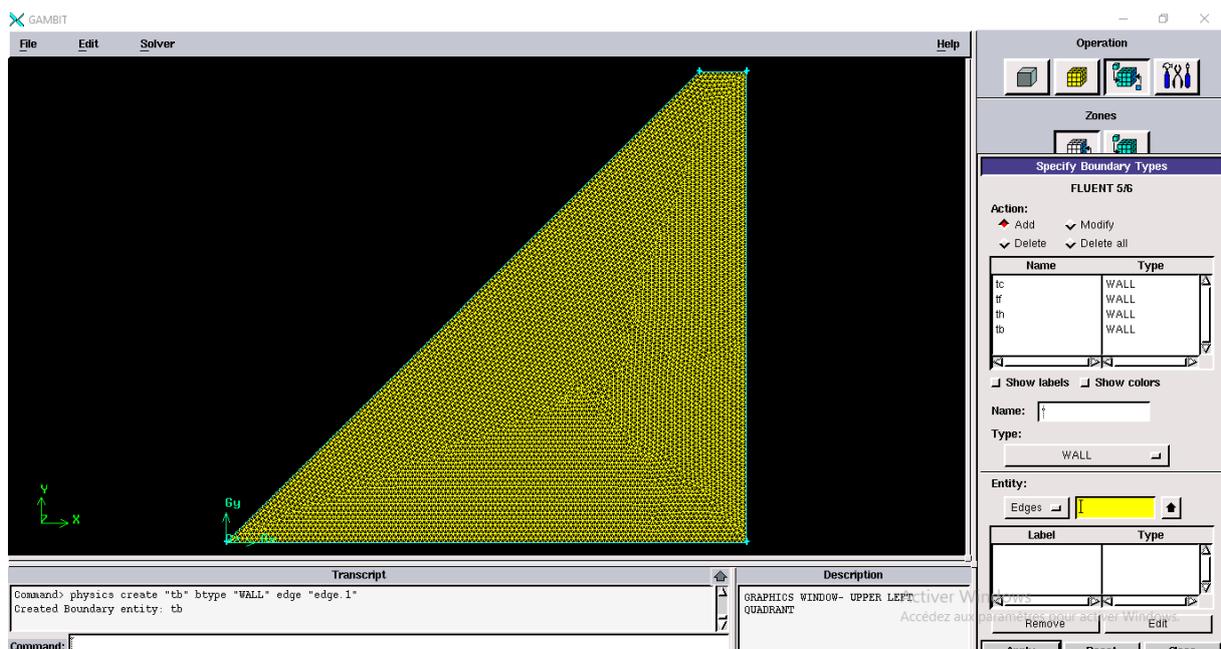


Figure 2.4 Incorporation des conditions aux limites

La figure suivante résume les différentes conditions qui peuvent être appliquées aux parois.

e) Exportation du maillage de Gambit

Une fois la géométrie créée et les conditions aux limites définies, le maillage est exporté vers le solveur Fluent en suivant ces étapes : Fichier → Exporter → Mesh.

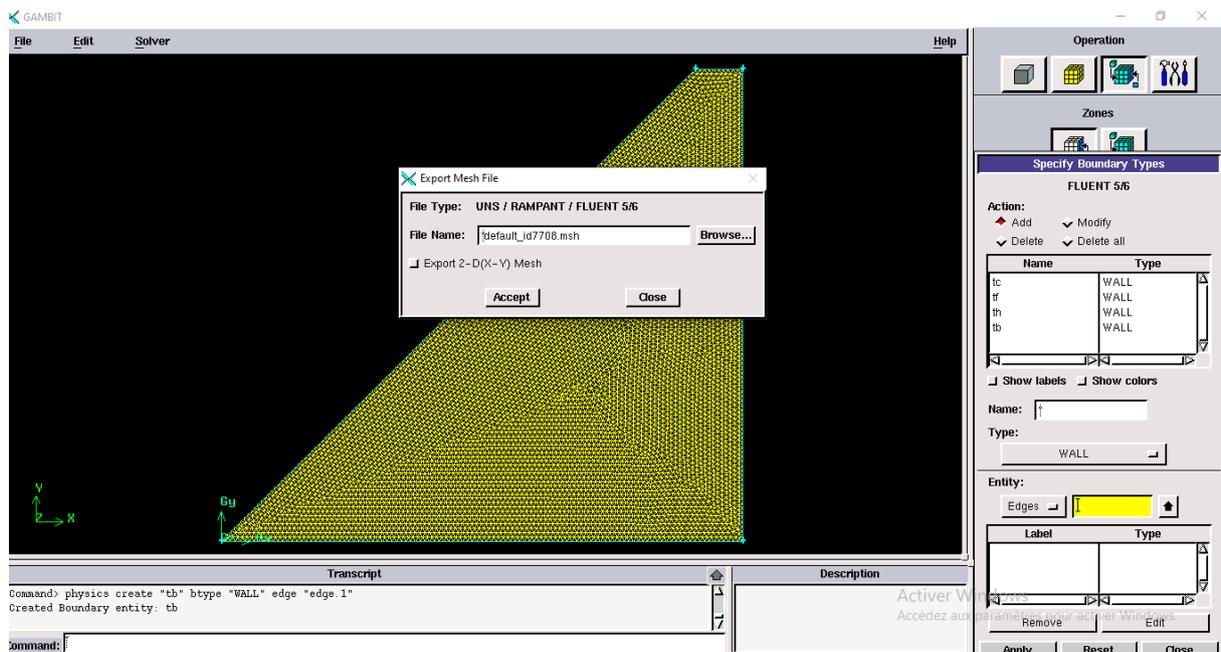


Figure 2.5 : Exportation du maillage.

Il est nécessaire d'exporter le maillage au format « .msh » pour qu'il soit compatible avec Fluent. Voici les étapes à suivre : enregistrer le fichier, puis l'importer dans Fluent.



Figure 2.6 : enregistrement du maillage

2.5 Le solveur fluent

a) Définition de fluent

Fluent est un logiciel de dynamique des fluides numérique (CFD) largement utilisé dans l'industrie pour simuler et analyser les écoulements fluides et les phénomènes thermiques. Il permet de modéliser des géométries complexes, d'appliquer des conditions aux limites, de spécifier les propriétés des fluides et de résoudre les équations de conservation des écoulements. Lors du démarrage de Fluent, l'utilisateur doit choisir les dimensions du domaine de calcul (2D ou 3D) ainsi que le niveau de précision, que ce soit en simple ou double précision.

b) Les étapes de solveur fluent

2.5.b.1 Lancer Fluent

Étant donné que notre géométrie est en 2D, nous avons opté pour une précision double (2ddp) pour notre étude dans le domaine de calcul. Cette sélection est identifiée de la manière suivante:



Figure 2.7 : Lancement du logiciel Fluent

2.5.b.2 Importation de la géométrie

Pour amorcer l'étude, il convient d'importer le fichier (*.msh) généré dans Gambit en suivant la procédure suivante :

File → Read → Case

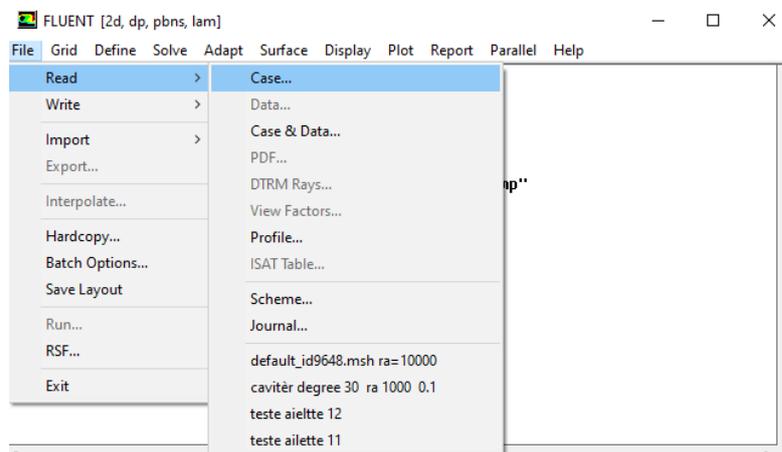


Figure 2.8 : Importation de la géométrie.

2.5.b.3 Vérification du maillage

Permet de vérifier l'intégrité du maillage importé pour détecter d'éventuelles déformations en accédant à : Grille → Vérification. **Grid** → **Check**

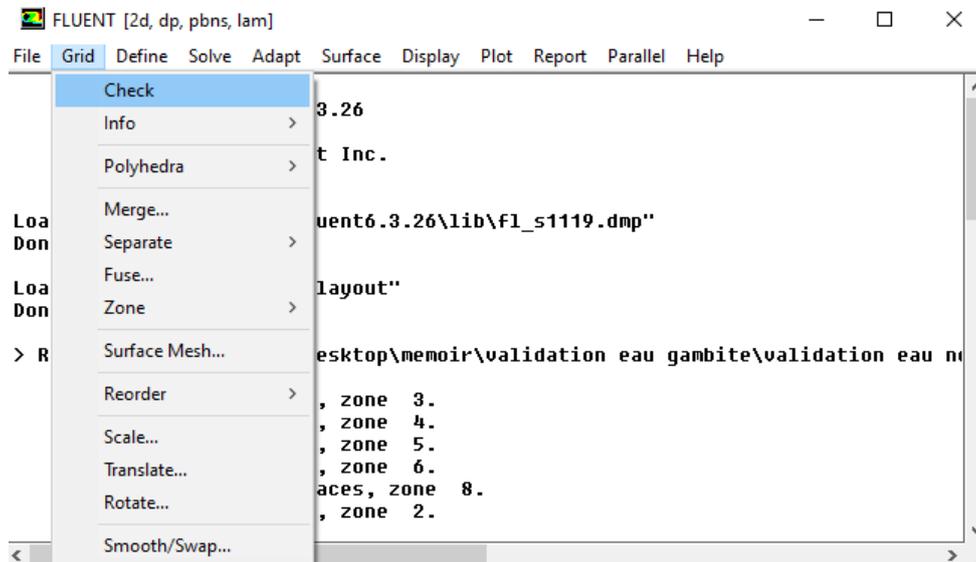


Figure 2.9 : Vérification du maillage

2.5.b.4 Vérification des unités et des dimensions

Il est nécessaire de vérifier que les dimensions et les unités affichées correspondent aux dimensions du modèle physique de notre cas en accédant à : **Grid** → **Scale**

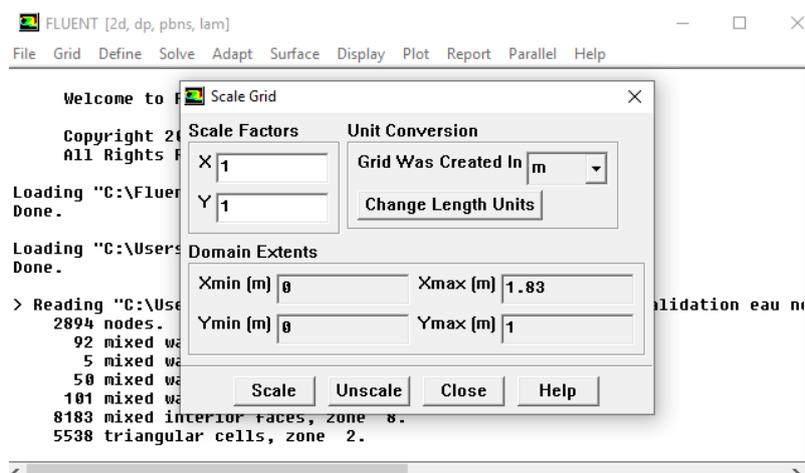


Figure 2.10 Vérification des dimensions et des unités

Remarque : Pour s'assurer que la géométrie correspond exactement à nos attentes, il est possible de vérifier la forme de la grille en sélectionnant : **display** → **grid**

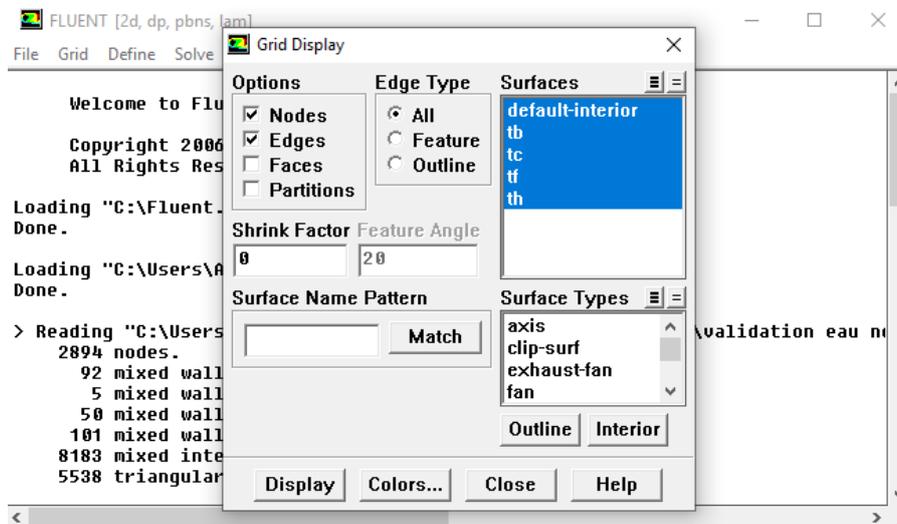


Figure 2.11 Vérification la forme de la grille en cliquant

Après avoir vérifié le maillage avec une échelle appropriée, nous passerons à la définition des paramètres de calcul, qui se trouvent dans le menu **Define**.

c) Définition du modèle

2.5.c.1 Choix du solveur

Ce menu permet de sélectionner le type de solveur que l'on souhaite utiliser (par exemple, schéma implicite, régime stationnaire, configuration 2D).

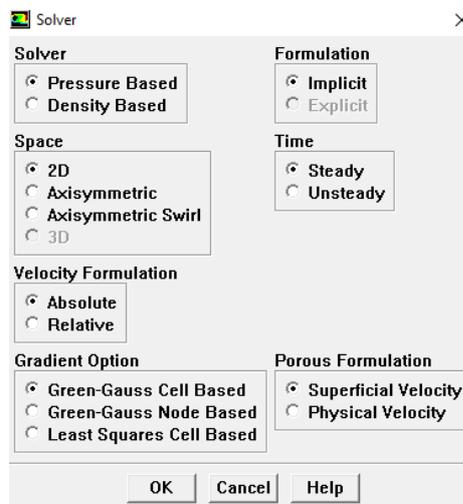


Figure 2.12 : Choix du solveur

2.5.c.2 Choix du régime d'écoulement :

Il existe différentes modélisations d'écoulement, telles que les écoulements non visqueux, laminaires et turbulents. **Define** → **Models** → **Viscous**

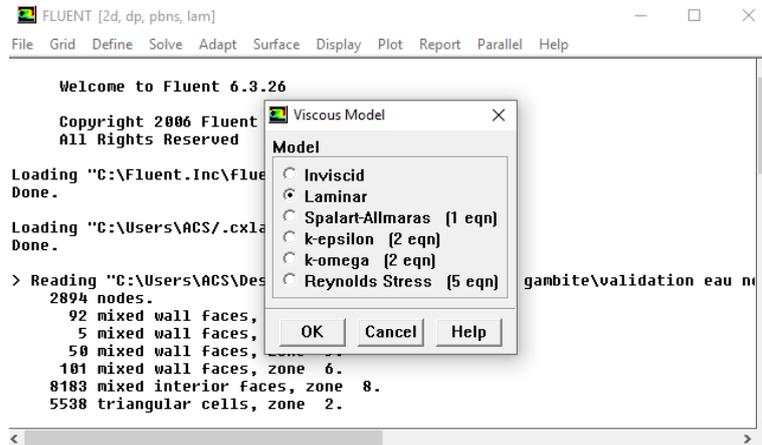


Figure 2.13 : Choix de modèle laminaire

d) Définition du matériel

2.5.d.1 Les caractéristiques du matériau

Le choix du fluide est défini de la manière suivante :

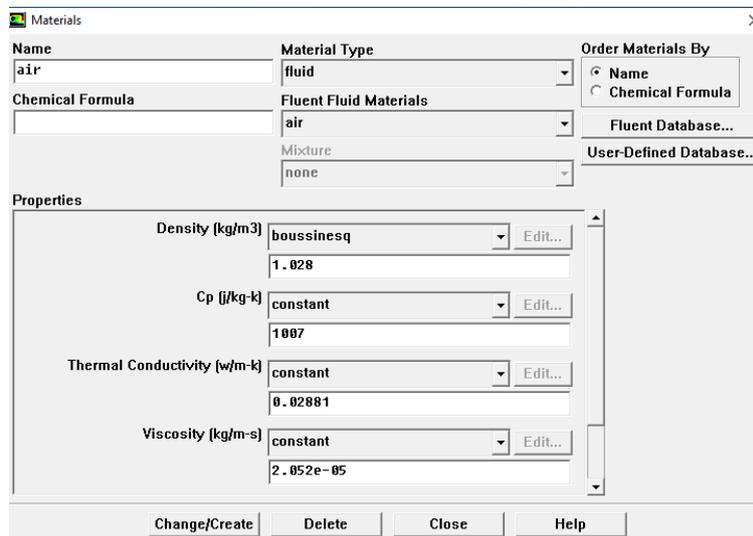


Figure 2.14 : Les caractéristiques du fluide

2.5.d.2 Les conditions opératoires

Cette étape permet de définir les conditions de fonctionnement :

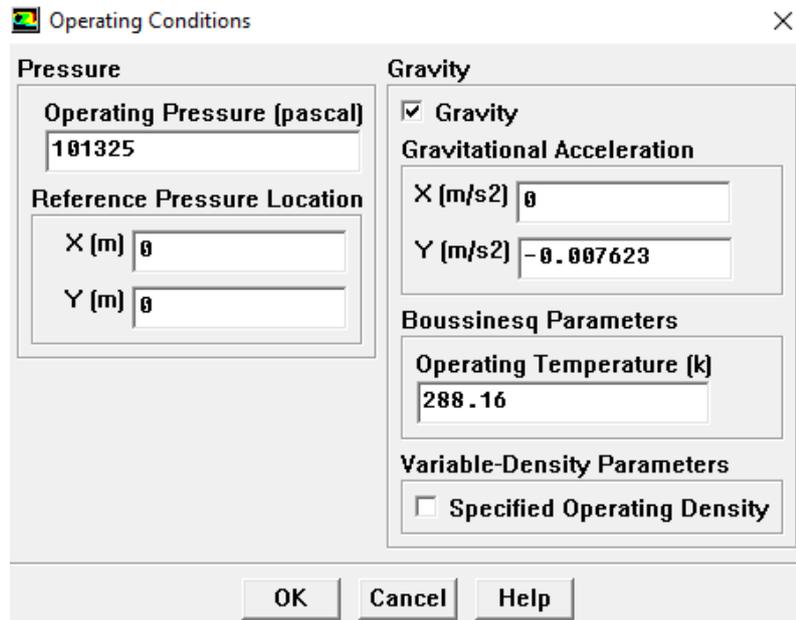


Figure 2.15 : choix des conditions opératoires

2.5.d.3 Les conditions aux limites

Il est important de spécifier les valeurs des conditions aux limites du problème à résoudre :

Define → Boundary conditions

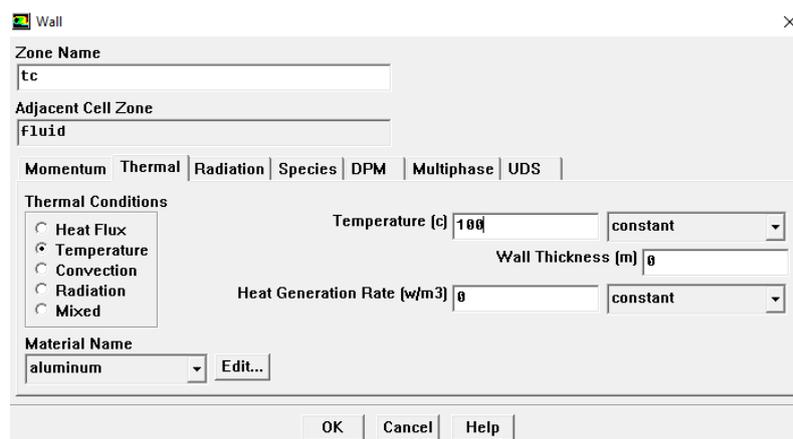


Figure 2.16 : Choix de température (conditions aux limites)

Le menu "Solve" permet de configurer les différents paramètres nécessaires pour initialiser le solveur de Fluent.

e) Le solveur

2.5.e.1 Contrôle de la solution :

Cette phase nous a permis d'évaluer les schémas de discrétisation, ainsi que de déterminer l'ordre des équations et l'algorithme de résolution. **Solve – Control – Solution**

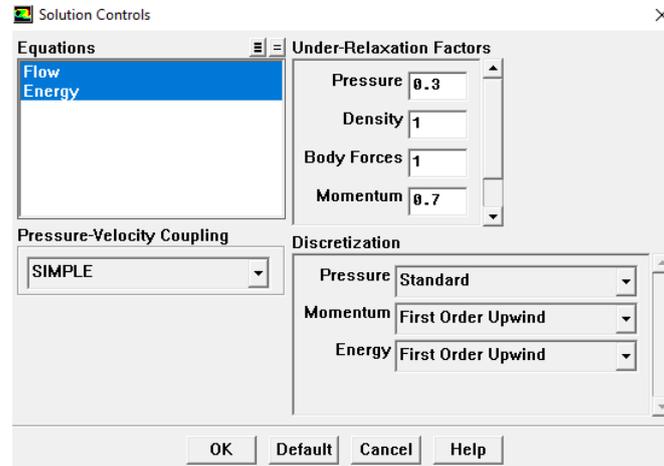


Figure 2.17 : Choix d'ordre d'équation

2.5.e.2 Initialisation

Cette option permet d'initialiser le calcul : Solve → Initialize → Initialize

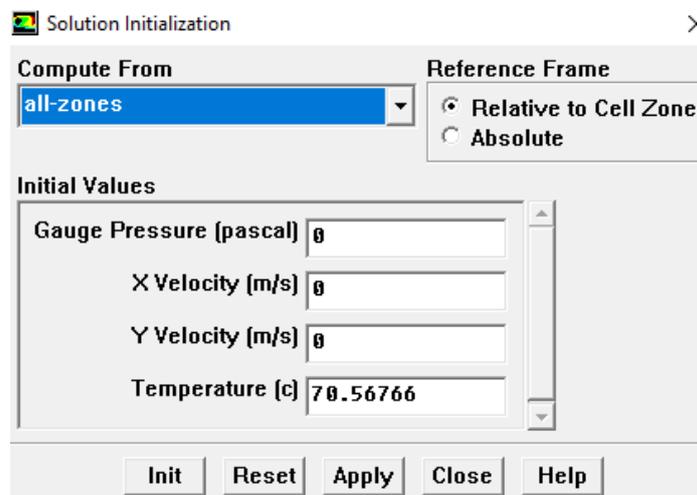


Figure 2.18: initialisation de calcul

2.5.e.3 Choix des critères de convergence :

Il se fait de favoriser les critères de convergence qui doivent être considérés pour que les calculs soient arrêtés:

Solve → **Monitors** → **Résidual**

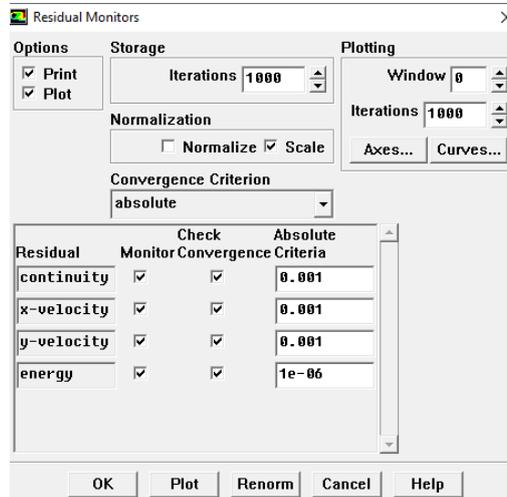


Figure 2.19 : Choix des critères de convergence

Remarque : Pour afficher la convergence sous forme d'un graphique à l'écran pendant les calculs, il est nécessaire d'activer l'option de tracé (Plot).

2.5.e.4 Lancement du calcul de convergence

Avant commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations : *solve* → *iterate*

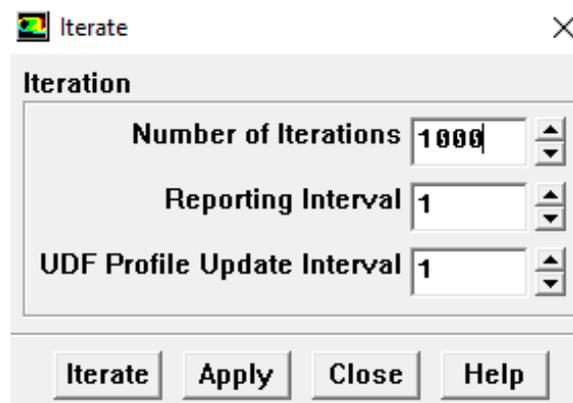


Figure 2.20 : Choix du nombre des itérations

2.5.e.5 Allures de l'évolution des résidus de calcul :

Le calcul est considéré comme convergé lorsque le résidu devient stable.

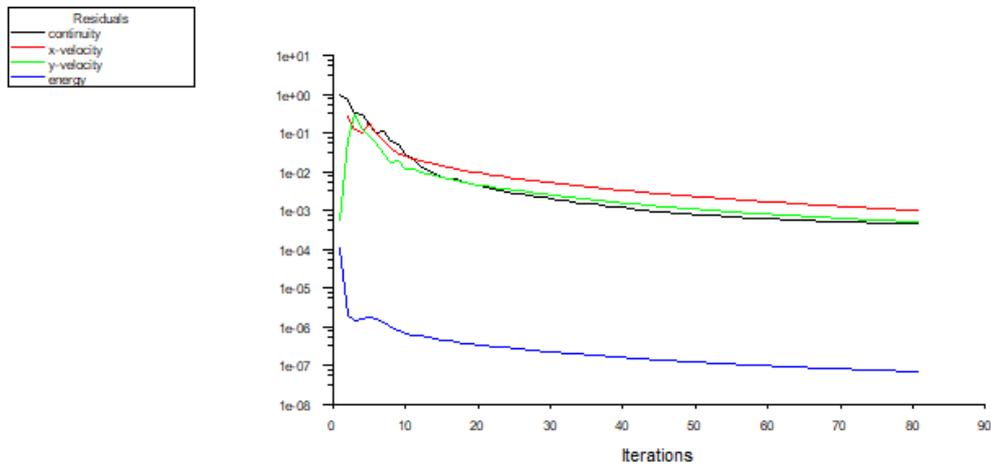


Figure 2.21 : Allures de l'évolution des résidus de calcul pour un maillage 110x60

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la procédure de résolution de notre problème physique sur Gambit/Fluent, comprenant les étapes suivantes : création de la géométrie, détermination des conditions aux limites, exportation du maillage vers Fluent, configuration des paramètres de calcul, résolution numérique, suivi de la convergence, visualisation et analyse des résultats. Cette approche permet une simulation précise et efficace des écoulements fluides et thermiques.

Dans le chapitre suivant, nous examinerons les résultats de validation du code ainsi que l'étude numérique d'un écoulement dans une cavité trapézoïdale contenant un fluide caloporteur (eau) en présence d'un gradient de température horizontal.

Chapitre 3

Résultats et discussion

3 Résultats et discussion

3.1 Introduction

Dans un premier temps, nous présenterons une étude de maillage pour la convection naturelle dans une cavité trapézoïdale, avec de angles d'inclinaison de 45° degré. Les parois horizontales supérieure et inférieure sont adiabatiques, la paroi inclinée est chauffée T_c et la paroi verticale est maintenue à basse température T_f . Nous utiliserons de l'eau comme fluide caloporteur avec un nombre de Rayleigh de 10^5 . Une validation des résultats sera effectuée Nous avons choisi un maillage de 110×60 .

En second lieu, nous effectuons une validation de la convection naturelle dans une cavité trapézoïdale fermée, avec un angle d'inclinaison de 120° degrés en comparant nos résultats avec les travaux de [14] pour un nombre de Rayleigh égal à 10^5 .

Dans un troisième temps, nous étudierons l'effet du nombre de Rayleigh pour un angle de 45° degrés. Les parois supérieure et inférieure horizontales resteront adiabatiques, tandis que la paroi inclinée est isotherme avec une température chaude T_c et la paroi verticale est isotherme avec une température froide T_f . Nous examinerons les cas où le nombre de Rayleigh varie entre 10^3 et 10^5 .

Ensuite, nous étudierons l'effet de l'inclinaison pour des angles de 30° , 45° et 60° pour un nombre de Rayleigh égale à 10^5 .

Enfin, nous examinerons l'effet des ailettes sur le transfert de chaleur en choisissant plusieurs dimensions d'ailettes. Pour mettre en évidence l'effet des ailettes nous fixerons les mêmes conditions aux limites que les cas. Nous utiliserons un nombre de Rayleigh égale à pour cette dernière simulation.

3.2 Validation du Calcul

a) Test du maillage (degré 45°)

La validation est réalisée avec une cavité trapézoïdale fermée avec un degré d'inclinaison 45°, où la paroi inclinée est chauffée, la paroi verticale est froide et les deux parois horizontales sont maintenues adiabatiques. Le nombre de Rayleigh est égal à 10^5 .

En examinant la variation du nombre de Nusselt en fonction du maillage sur la figure 3.2, nous avons adopté le maillage de 110 nœuds pour les parois chaudes et froides, et le maillage de 60 nœuds pour les parois adiabatiques.

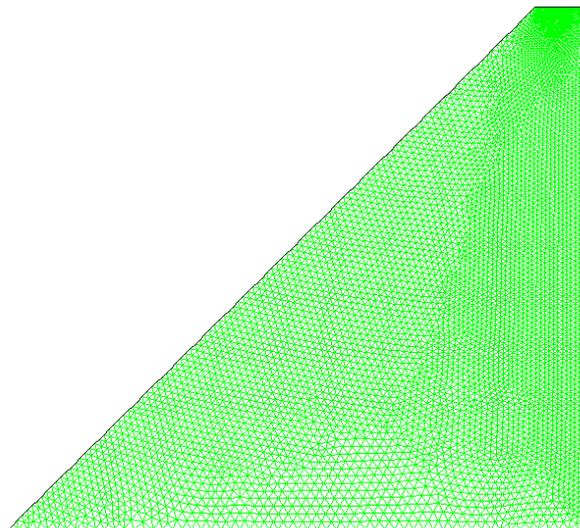


Figure 3.1 Forme des maillages utilisés

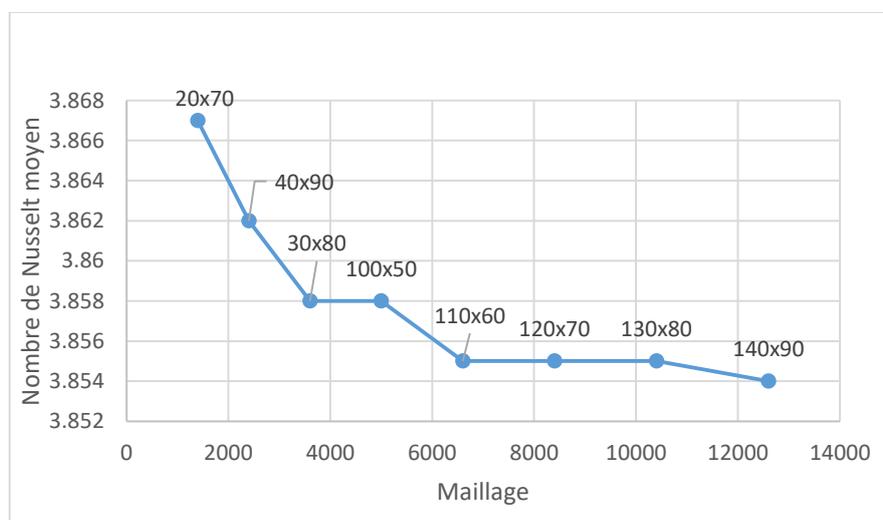


Figure 3.2 Etude du maillage pour le cas de la convection naturelle ($Ra = 10^5$)

b) Validation du code de calcul

Pour valider notre code de calcul CFD, nous effectuons une simulation numérique de la convection naturelle dans une cavité trapézoïdale fermée, avec un angle d'inclinaison de 120° degrés en comparant nos résultats avec les travaux de [14] pour un nombre de Rayleigh égale à 10^5 .

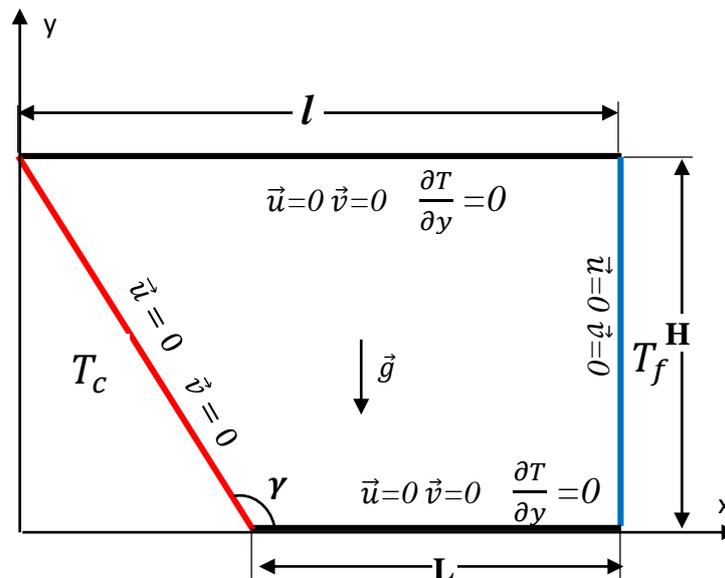


Figure 3.3 : Modèle physique de validation

3.2.b.1 Les propriétés de l'air

Pr	μ (Pa.s)	α (m ² /s)	λ (W/m.K)	c_p (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	β (1/K)
0.71	$2.052 \cdot 10^{-5}$	$2.780 \cdot 10^{-5}$	0.0288	1007	1.028	$1.995 \cdot 10^{-5}$	$2.9154 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3.1 Les propriétés de l'air

3.2.b.2 Validation quantitative

Hauteur (m)	Nu Présent travail	Nu la [référence]	Erreur
0.5	3.5192	3.5745	1.54%
1	3.7520	3,7348	0.463%
1.5	3.9460	3,9491	0,078%

Tableau 3.2 Validation avec les travaux de [14] pour $Ra=10^5$

Pour des nombres de Rayleigh de 10^5 on constate que l'erreur maximale ne dépasse pas les 1.54 % ce qui signifie que nos résultats sont en bon accord avec ceux de la littérature.

3.3 Résultats et discussions

Dans cette partie, nous allons étudier le cas proposé dans ce sujet : la convection naturelle dans une cavité trapézoïdale. Une température froide est imposée le long de la paroi verticale, tandis que la paroi inclinée reste chaude. Les parois sont adiabatiques comme indiqué sur la figure. Le maillage utilisé est celui qui a été sélectionné lors de la validation, soit 110x60.

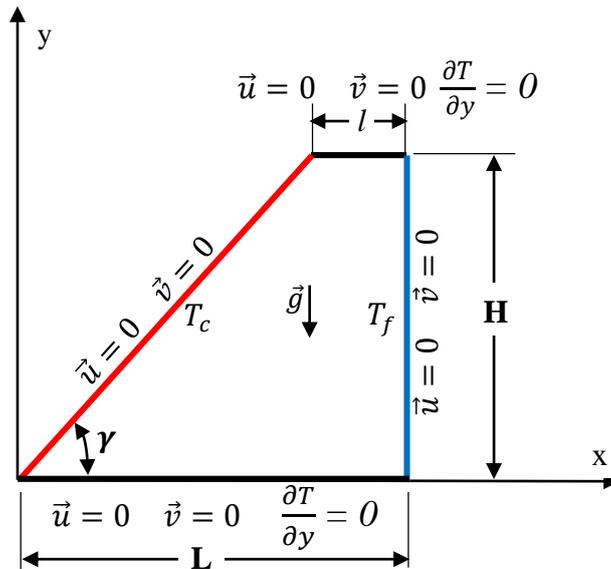


Figure 3.4 Le modèle physique

a) Étude de l'influence du nombre de Rayleigh à 45°

Nous simulons le comportement thermique de l'eau contenue dans une cavité trapézoïdale fermée avec une paroi inclinée de 45° chaude et une paroi verticale froide. Les parois horizontales sont supposées adiabatiques. Nous varions le nombre de Rayleigh entre $Ra=10^3$ et 10^5 .

3.3.a.1 Les propriétés de l'eau

μ	α	λ	c_p	ρ	μ	β
$0.467 \cdot 10^{-3}$	$1.589 \cdot 10^{-7}$	0.654	4185	983.3	$4.7149 \cdot 10^{-7}$	$0.517 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3.3 Les propriétés de l'eau

3.3.a.2 Lignes Isothermes

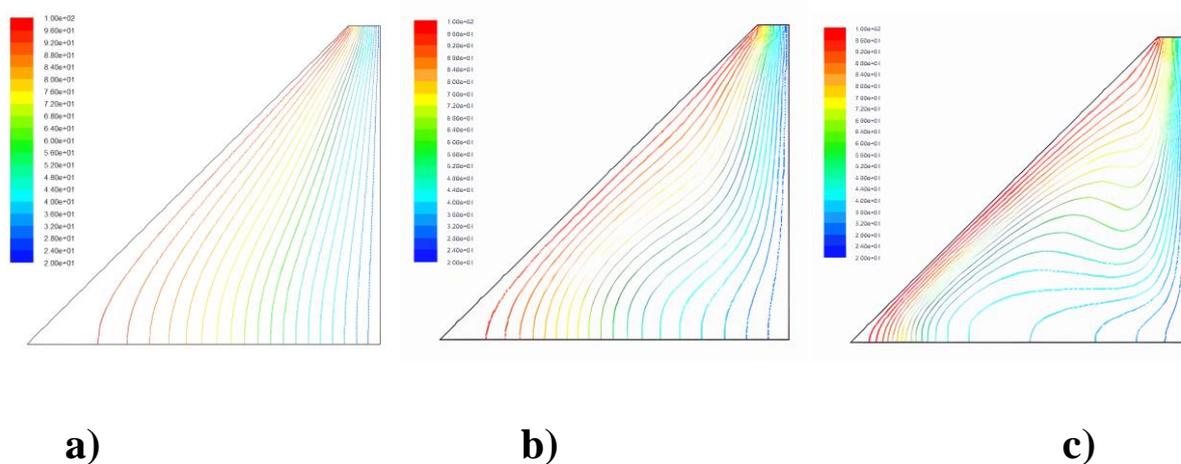


Figure 3.5 Distribution de température
a) $Ra=10^3$, b) $Ra=10^4$ c) $Ra=10^5$

La force de flottabilité est le moteur principal de la convection naturelle dans votre cavité trapézoïdale. Elle provoque le mouvement du fluide chaud vers le haut et du fluide froid vers le bas, créant des cellules de convection.

Les forces visqueuses sont responsables de la résistance au mouvement du fluide à l'intérieur de la cavité. Elles déterminent la viscosité du fluide, c'est-à-dire sa capacité à s'écouler. À des valeurs de Ra plus faibles, où la convection naturelle est moins prononcée, les forces visqueuses dominent, limitant les mouvements du fluide à des régions proches des parois et favorisant la conduction thermique plutôt que la convection.

le nombre de Rayleigh est essentiel pour prédire le comportement de la convection naturelle dans un système fluide. Plus Ra est élevé, plus les mouvements de convection sont forts et plus le transfert de chaleur est efficace on observe $Ra=10^3$ Les lignes isothermes seront principalement parallèles aux parois chaude et froide. Cela signifie que la température varie progressivement de la paroi chaude à la paroi froide sans perturbations significatives dues à la convection. Les lignes isothermes seront régulières et lisses, indiquant une distribution de température uniforme. La transition thermique se fait de manière stable du côté chaud vers le côté froid. Indique faible force flottabilité

Pour $Ra=10^4$ Les lignes isothermes commencent à montrer des courbures significatives, indiquant l'influence croissante de la convection naturelle. On peut observer des zones de mélange entre l'eau chaude et froide. À ce niveau de Ra , la convection naturelle commence à

jouer un rôle significatif. Les mouvements convectifs augmentent le transfert de chaleur, créant des zones de mélange thermique. La force de flottabilité est modérée.

Pour $Ra = 10^5$, nous remarquons que les lignes isothermes sont fortement courbées et irrégulières, montrant des zones de température bien mélangées. Les gradients de température sont moins réguliers en raison des mouvements convectifs intenses. La convection naturelle domine largement le transfert de chaleur. Les mouvements vigoureux du fluide entraînent un mélange thermique efficace, perturbant fortement la distribution de température initiale. La force de flottabilité est élevée.

3.3.a.3 Lignes de Courant

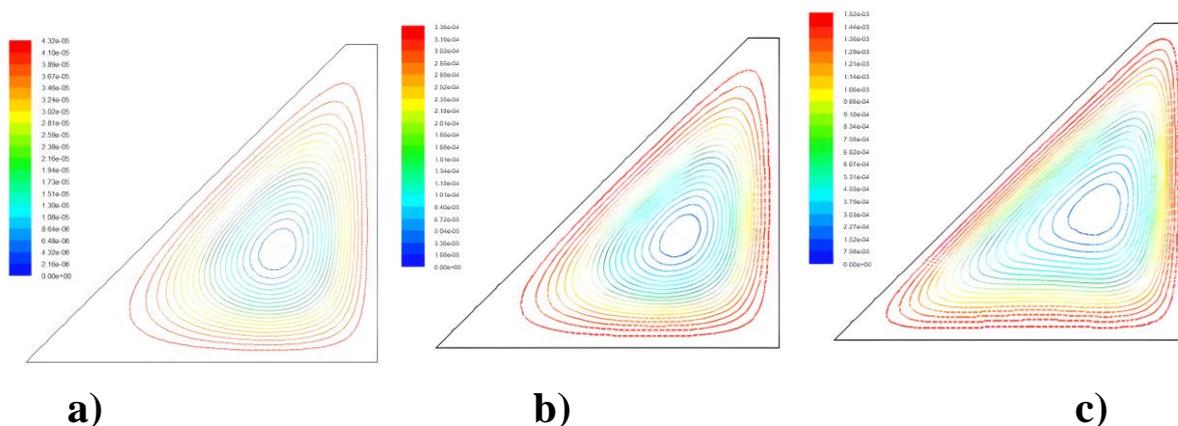


Figure 3.6 Lignes de Courant
a) $Ra=10^3$, b) $Ra =10^4$ c) $Ra =10^5$

Pour $Ra = 10^3$ on remarque que Les lignes de courant sont faibles et peu marquées, indiquant une circulation convective très limitée. À ce niveau de Ra , la convection naturelle est faible et la conduction prédomine. Les mouvements du fluide sont minimes.

Pour $Ra = 10^4$ Les lignes de courant deviennent plus définies, montrant l'apparition de cellules de convection. Ces cellules sont responsables de la circulation interne du fluide.

La convection commence à jouer un rôle plus important, et la convection commence à dominer vis-à-vis de la conduction.

Pour $Ra = 10^5$, les lignes de courant sont très marquées et montrent des cellules de convection bien développées, avec des tourbillons et des zones de recirculation prononcées.

Cette valeur élevée de Ra , la convection naturelle domine largement. Les mouvements du fluide créent une distribution complexe des températures, augmentant le transfert de chaleur par convection.

Lorsque Ra est faible, les mouvements de fluide sont limités, ce qui résulte des cellules de

convection de vitesses faible, plus petites et concentrées le long des parois. À mesure que Ra augmente, les mouvements convectifs deviennent plus dynamiques, permettant aux cellules de convection de se développer et de s'étendre dans l'espace disponible, créant ainsi des structures de circulation plus larges et plus complexes à l'intérieur de la cavité.

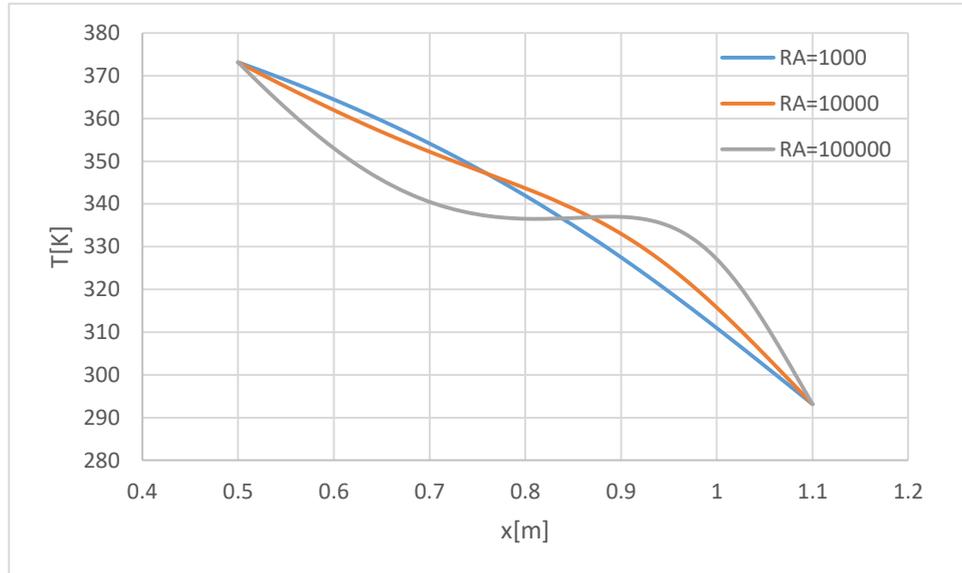


Figure 3.7 Profil de température à $Y = 0.5$ pour $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$

Nous pouvons remarquer que l'évolution de la température à travers la cavité horizontalement est presque linéaire pour $Ra=10^3$, ce qui traduit un régime dominé par la conduction thermique, alors que lorsque le nombre de Rayleigh commence à augmenter ($Ra=10^5$) les profils de températures se tordent et prennent la forme d'un S. Cette évolution est provoquée par l'écoulement convectif. Ce qui montre des mouvements convectifs plus dynamiques à l'intérieur de la cavité pour des nombres de Rayleigh importants.

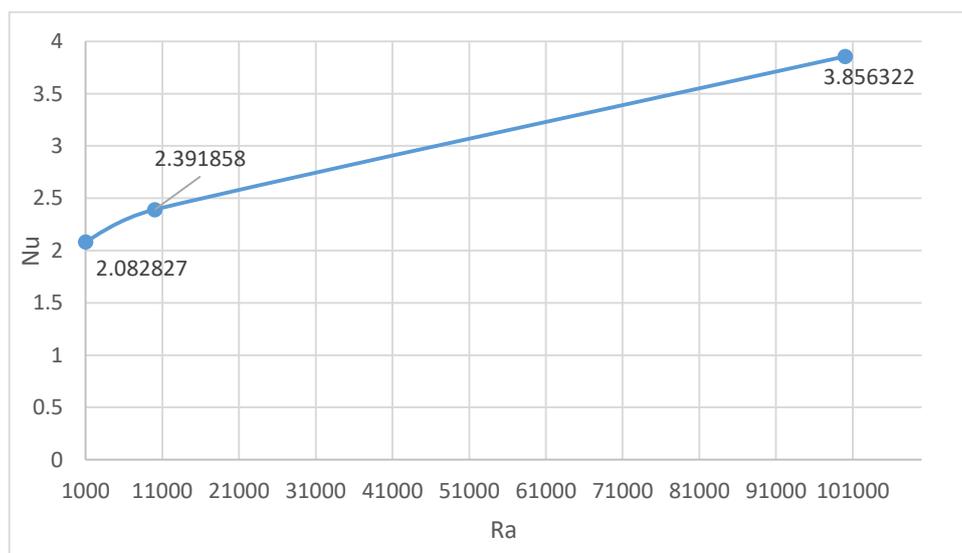


Figure 3.8 Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh

La figure 3.7 montre que plus la valeur du nombre de Rayleigh Ra augmente (10^3 , 10^4 , 10^5), plus le nombre de Nusselt Nu augmente, ce qui traduit une intensification de l'effet de convection naturelle par rapport à la conduction.

b) Étude de l'effet de l'inclinaison à 45° , 30° et 60°

Nous analysons dans cette partie l'effet de l'inclinaison de la paroi chaude sur le transfert convectif dans la cavité trapézoïdale en faisant varier l'angle de 45° , 30° et 60° . En maintenant les mêmes conditions que le cas précédent et en fixant le nombre de Rayleigh à $Ra = 10^5$.

3.3.b.1 Lignes Isothermes

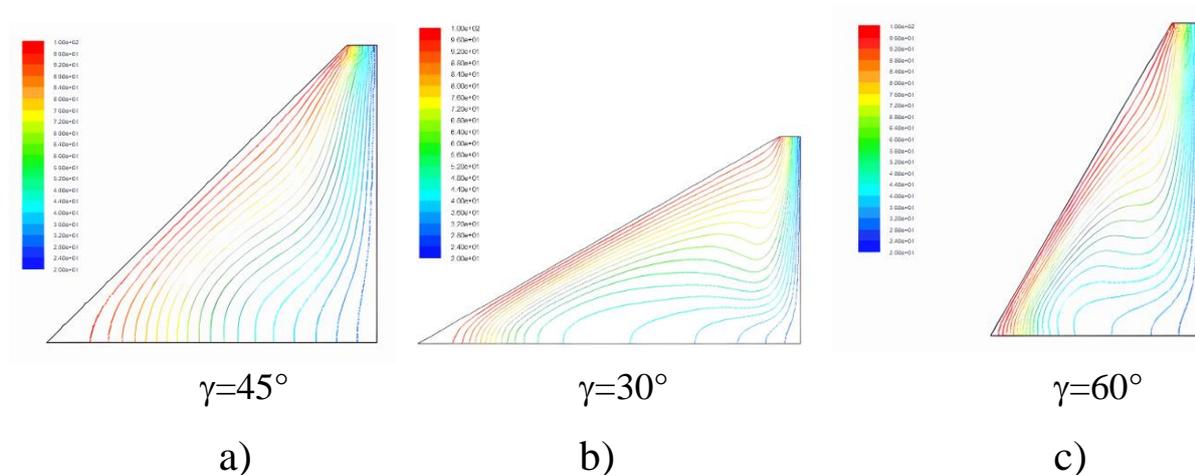


Figure 3.9 Effet de l'inclinaison de la paroi chaude sur la distribution de température pour $Ra=10^5$
a) $\gamma=45^\circ$, b) $\gamma=30^\circ$, c) $\gamma=60^\circ$

Inclinaison de 30° : Avec une inclinaison faible, les lignes isothermes suivent une trajectoire plus droite à travers la cavité. La différence de température entre la paroi chaude et la paroi froide est perceptible mais relativement uniforme le long de la cavité.

Inclinaison de 45° : À cette inclinaison, les lignes isothermes montrent des variations plus marquées. Elles s'inclinent davantage vers le bas du côté froid de la cavité, reflétant une différence de température plus prononcée entre les parois.

Inclinaison de 60° : Avec une inclinaison plus prononcée, les lignes isothermes deviennent plus courbées, se rapprochant davantage de la paroi chaude. Cela indique une concentration plus importante de la chaleur près de la paroi chaude et une différence de température plus extrême entre les deux parois.

3.3.b.2 Lignes de Courant

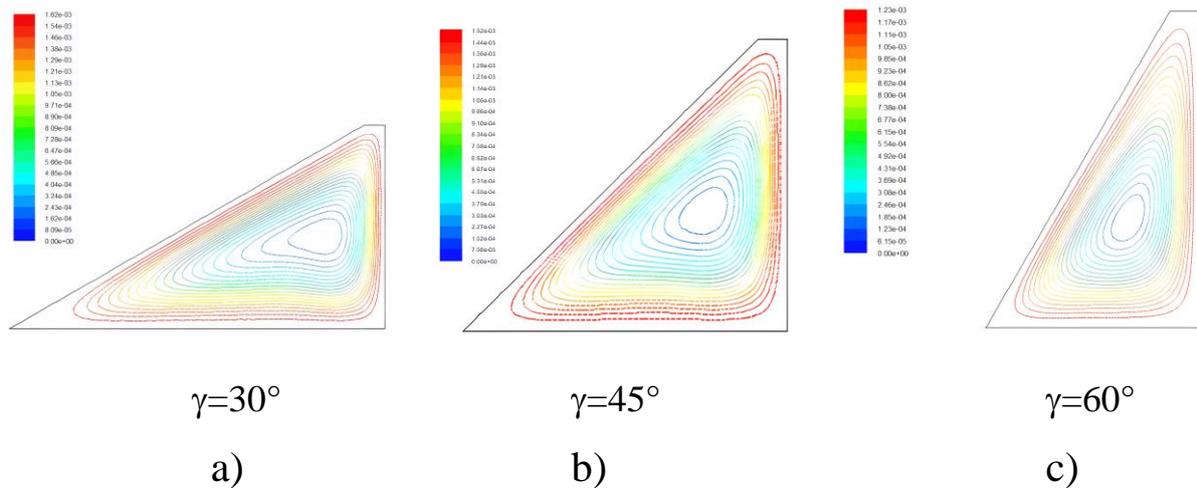


Figure 3.10 Effet de l'inclinaison de la paroi chaude sur la structure de l'écoulement pour $Ra=10^5$
a) $\gamma=45^\circ$, b) $\gamma=30^\circ$, c) $\gamma=60^\circ$

Inclinaison de 30° : À cette inclinaison faible, les cellules de convection montrent généralement un mouvement relativement régulier du fluide le long de la cavité. Les cellules peuvent être de taille modérée, avec un flux de chaleur qui se déplace de la paroi chaude vers la paroi froide de manière relativement ordonnée.

Inclinaison de 45° : Avec une inclinaison plus modérée, les cellules de convection deviennent plus marquées. Elles montrent un flux plus dirigé vers le bas de la cavité, avec des tourbillons plus visibles et une circulation plus accélérée du fluide. Les cellules peuvent devenir plus grandes et plus dynamiques, facilitant un transfert de chaleur plus important à travers la cavité.

Inclinaison de 60° : À une inclinaison importante, les cellules de convection deviennent turbulentes et très dynamiques. Elles montrent un mouvement tourbillonnaire intense du fluide à travers la cavité, avec des tourbillons vigoureux qui redistribuent rapidement la chaleur. Les cellules peuvent être de grande taille et se déplacer de manière chaotique, maximisant ainsi le transfert de chaleur par convection.

Une inclinaison plus élevée intensifie les gradients de température et augmente l'efficacité du transfert de chaleur par convection, ce qui est crucial pour comprendre et optimiser le comportement thermique de la cavité dans diverses applications.

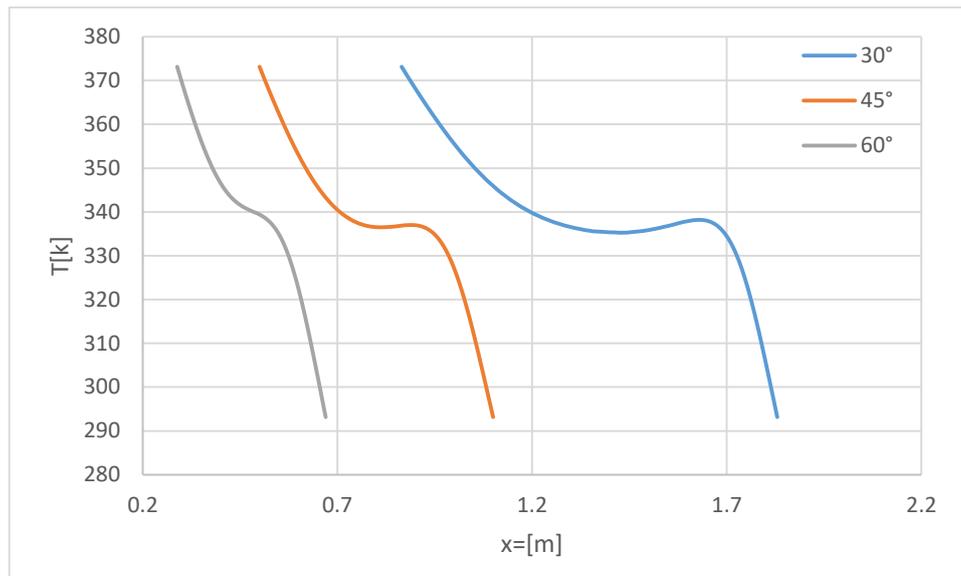


Figure 3.11 Profil de température à $Y = 0.5$ pour $Ra=10^5$

Inclinaison de 60° : La température montre une variation brusque de la paroi chaude à la paroi froide, avec des gradients de température important à travers la cavité, car avec cette inclinaison les parois sont proches l'une par rapport à l'autre.

Inclinaison de 45° : La température présente des variations plus modérées près des parois avec des gradients prononcés, et un palier de température constant qui traduit une stratification verticale de température.

Inclinaison de 30° : Près de la paroi chaude inclinée le gradient de température est faible, alors que près de la paroi froide verticale le gradient de température reste important de la même intensité que pour l'angle 45°. Par contre, le centre de la cavité présente un palier de température plus large qui traduit une zone plus importante de stratification verticale.

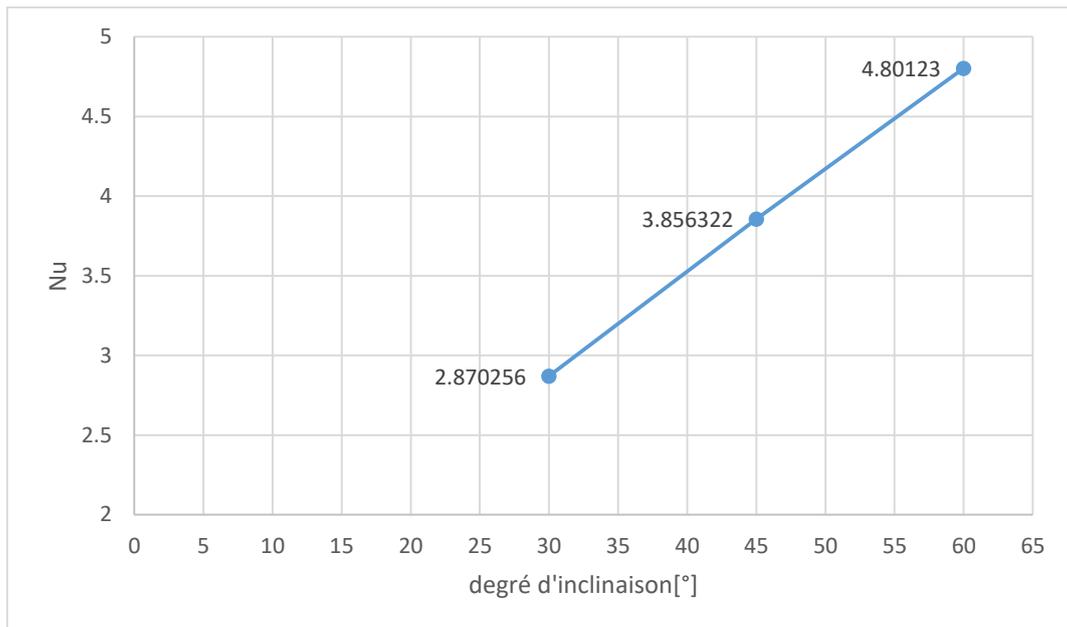


Figure 3.12 Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du degré D'inclinaison.

La courbe montre une augmentation du nombre de Nusselt d'inclinaison Cela indique que le transfert de chaleur par convection naturelle devient plus efficace.

c) Effet des ailettes sur le transfert de chaleur.

Nous étudions dans cette partie le transfert thermique dans les mêmes conditions que les cas précédents d'une cavité trapézoïdale dont la paroi chaude est inclinée d'un angle de 45° et équipée d'ailettes sur sa partie intérieure. Les ailettes ont une longueur de 10 cm dans un premier cas et 18 cm dans un deuxième cas avec une épaisseur de 5 mm. Nous fixerons un nombre de Rayleigh à 10^5 .

3.3.c.1 La distribution de températures

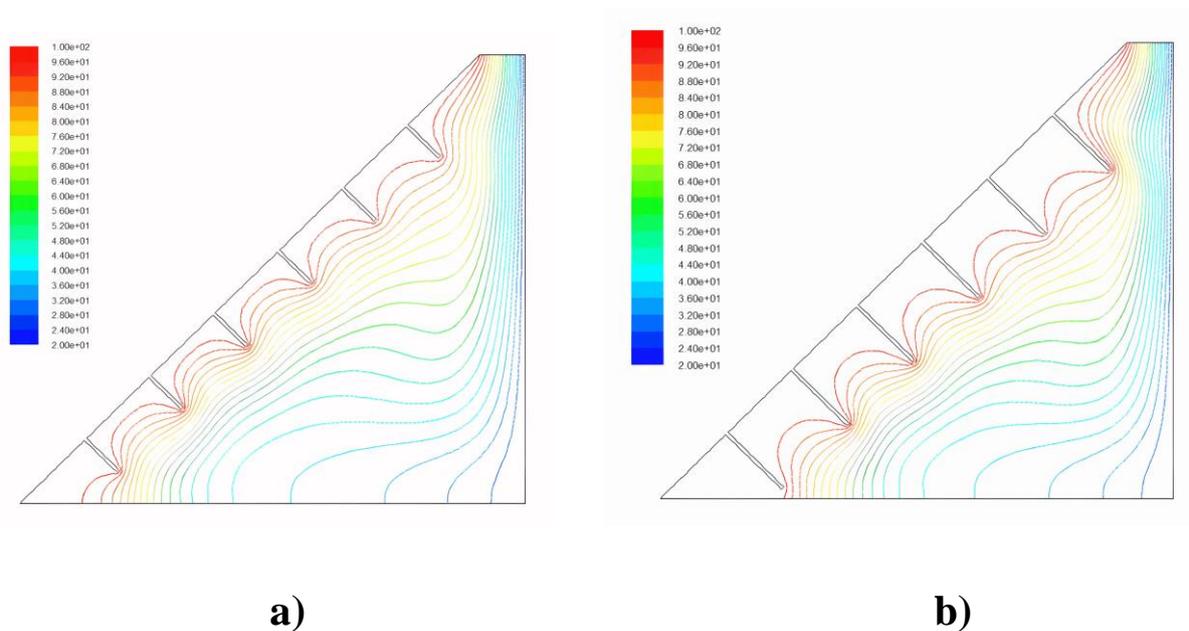


Figure 3.13 Effet des ailettes sur la distribution de température pour $Ra=10^5$
a) $A=10$ cm b) $A=18$ cm

Ailettes de 10 cm : Les lignes isothermes montrent des variations locales autour des ailettes, avec des zones de température plus basse près des ailettes. Cela indique un transfert de chaleur accru à proximité des surfaces des ailettes

Ailettes de 18 cm : Les lignes isothermes sont plus uniformes le long de la cavité, indiquant un transfert de chaleur plus homogène à travers toute la cavité. Les ailettes plus longues augmentent la surface d'échange par rapport aux ailettes plus courtes 10 cm ou par rapport à la paroi sans ailettes, donc cela permet un transfert thermique plus important.

3.3.c.2 Lignes de Courant

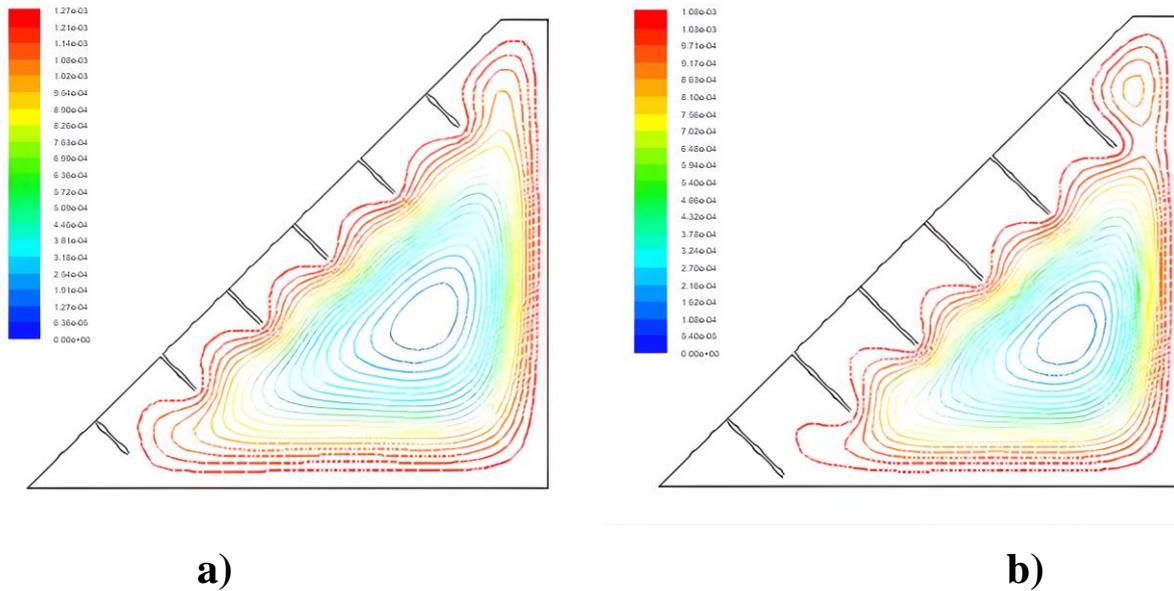


Figure 3.14 Lignes de Courant pour a) $A = 10\text{ cm}$ b) $A = 18\text{ cm}$

Ailettes de 10 cm : Les lignes de courant sont plus sinueuses, avec des ondulations plus petits et fréquents autour des ailettes. Cela favorise une agitation locale du fluide et augmente le transfert de chaleur près des ailettes.

Ailettes de 18 cm : Les lignes de courant sont plus régulières, avec des ondulations plus grands et moins fréquents. Cela assure un flux de fluide plus stable à travers la cavité, optimisant ainsi le transfert de chaleur sur une plus grande surface.

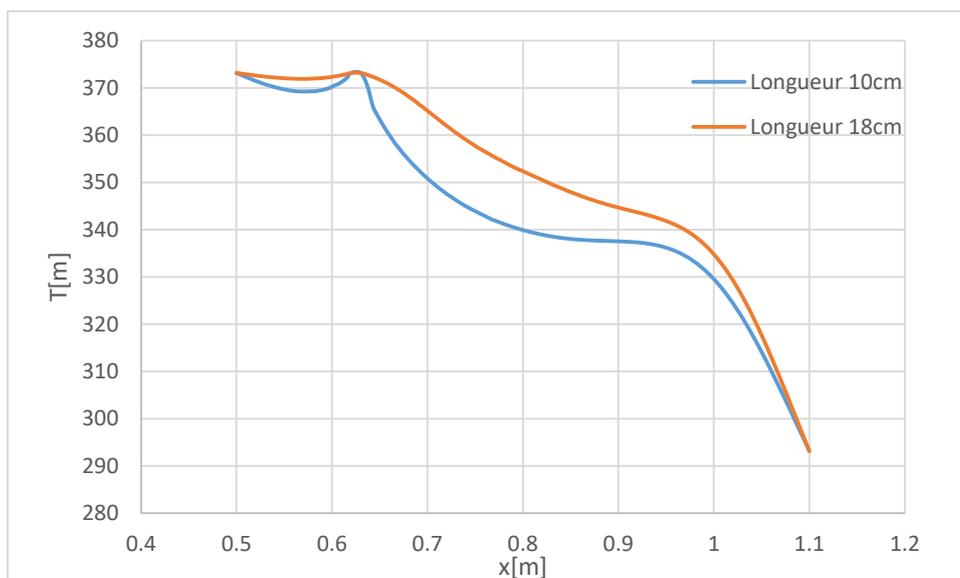


Figure 3.15 Profil de température à $Y = 0.5$

Ailettes de longueur 10 cm : Les variations locales de température sont plus marquées près des ailettes de 10 cm, indiquant une augmentation du transfert de chaleur localisé.

Ailettes de longueur 18 cm : La température est plus uniforme le long de la cavité avec les ailettes de 18 cm, montrant un transfert de chaleur plus étendu et homogène.

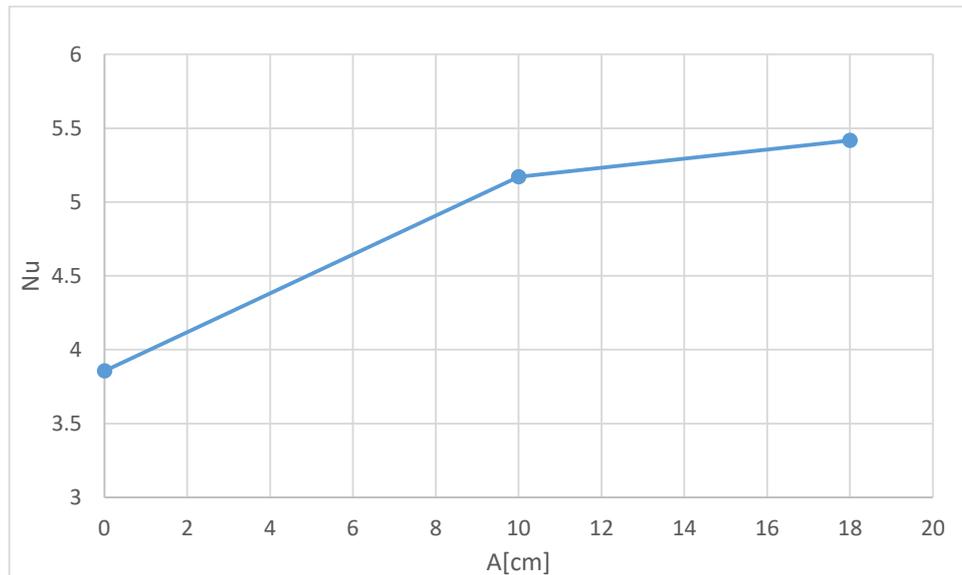


Figure 3.16 Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la longueur de l'ailette

La courbe du nombre de Nusselt en fonction de Rayleigh montre une augmentation significative de Nu avec l'ajout d'ailettes. Cette augmentation indique une amélioration du transfert de chaleur grâce aux ailettes.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des résultats obtenus par la simulation de notre problème, qui consiste à étudier la convection naturelle dans une cavité trapézoïdale. Nous avons commencé par un test de maillage, puis par la validation des résultats obtenus avec la littérature pour des cas classiques de convection naturelle dans une cavité trapézoïdale inclinée à 120°. Nous avons ensuite étudié l'influence des nombres de Rayleigh pour une inclinaison de 45°, puis l'influence de l'inclinaison pour des angles de 30°, 45° et 60°. Ensuite, nous avons étudié l'influence des ailettes de différentes longueurs (10 cm et 18 cm), en présentant et en discutant les résultats obtenus. Nous avons conclu que l'augmentation du nombre de Rayleigh, de l'inclinaison et l'ajout d'ailettes augmentent le nombre de Nusselt, ce qui améliore le transfert de chaleur.

Conclusion Générale

Cette étude a permis de contribuer aux travaux concernant les phénomènes de convection naturelle à l'intérieur de cavités trapézoïdales, en examinant divers paramètres influençant le transfert de chaleur et la dynamique fluide. À travers une série d'études systématiques et de simulations numériques, nous avons mis en évidence l'impact, du nombre de Rayleigh, de l'angle d'inclinaison et des ailettes sur les performances thermiques dans ce type de cavité.

Dans un premier temps, nous avons étudié la sensibilité du maillage sur les résultats obtenus en convection naturelle dans une cavité trapézoïdale, avec un angle d'inclinaison de 45° degré.

La cavité choisie pour notre étude, comporte des parois supérieure et inférieure horizontales adiabatiques, une paroi inclinée chaude et une paroi verticale froide. Cette cavité pouvant être utilisée pour stocker l'énergie thermique sensible, nous avons utilisé de l'eau comme fluide caloporteur. Les résultats ont été validés et comparés à ceux trouvés dans la littérature.

Nous avons étudié l'effet du nombre de Rayleigh pour une cavité trapézoïdale inclinée à 45° , en utilisant de l'eau comme fluide. Nos investigations ont révélé que des variations significatives du nombre de Rayleigh influencent considérablement le transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité, mettant en évidence l'importance de ce paramètre pour l'optimisation des performances thermiques.

Nous avons également exploré l'effet de l'inclinaison de la cavité pour des angles de 30° , 45° et 60° , observant des changements distincts dans la distribution thermique et la formation des cellules de convection. Ces observations offrent des perspectives précieuses pour la conception et l'optimisation de systèmes thermiques adaptés à des environnements variés et à des besoins spécifiques.

Enfin, l'étude des ailettes a démontré que l'introduction de dispositifs d'ailettes, notamment avec des dimensions plus grandes (10 cm et 18 cm de longueur, 5 mm d'épaisseur), améliore de manière significative l'efficacité du transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité. Cette approche pourrait jouer un rôle crucial dans le développement de solutions thermiques plus efficaces et durables pour diverses applications industrielles et environnementales.

En conclusion, cette recherche enrichit notre compréhension des mécanismes de convection naturelle dans les cavités trapézoïdales et propose des recommandations pratiques pour

l'amélioration des performances thermiques. Les résultats obtenus sont essentiels pour relever les défis croissants liés à l'efficacité énergétique et à la durabilité environnementale, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles innovations dans le domaine des transferts thermiques.

Bibliographie

- [1] 1902: Fourier, J. B. J. Théorie de la chaleur. Paris: Gauthier-Villars.
- [2] 1950: McAdams, W. H. Heat transmission. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- [3] 1954: Duffie, J. A., & Beckman, W. A. Solar engineering for thermal processes. New York: John Wiley & Sons.
- [4] 1956: "Thermal energy storage" par H.E.Bacon. Power Engineering 60 (11): 82-87.
- [5] 1959: Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. Transport Phenomena. New York: John Wiley & Sons.
- [6] 1980: Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. Transport Phenomena. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- [7] 1981: "Latent heat thermal energy storage: A review" par B.V.Shah. Solar Energy 27 (3) : 253-260
- [8] 1987: Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.
- [9] 1999: Kakaç, S., & Pramuk, A. "Natural Convection." In Fundamentals of Heat and Mass Transfer (3rd ed., pp. 415-485). New York: Addison Wesley Longman.
- [10] 2001: "Sensible heat thermal energy storage" par A.S.Tesfamichael, M.E.Andersson, and R.K.Poole. Solar Energy 70 (3-4): 253-263
- [11] 2003: "Phase change materials for thermal energy storage" par A.Mehling
- [12] 2006: Mills, A. F. "Natural Convection." In Basic Heat Transfer (pp. 279-329). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- [13] 2009: "Review of solar energy storage technologies" par B.Reddy, J.DeLuca, and B.Zhou. Solar Energy 83 (8): 1014-1021.
- [14] April 2010: Numerical Study of Laminar Natural Convection in a Side-Heated Trapezoidal Cavity at Various Inclined Heated Sidewalls : KHALIL LASFER,-MOUNIR BOUZAIANE-TAIEB LILI
- [15] 2011: Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [16] 2013: Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. "Natural Convection." In Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications (5th ed., pp. 534-591). Boston: McGraw-Hill.
- [17] 2013: Kalogirou, S. A. Solar energy systems and applications. 2nd ed. New York: Elsevier.

[18] 2015: "The role of energy storage in a modern electricity grid" par R.Feron, R.Yang, and F.Boucher. Energy Reports 1 (2): 93-104.

[19] 2016, Boutaoui Meriem. Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique

[20] 2019, Heat transfer in a side heated trapezoidal cavity with openings : B.M. Krishne Gowda a M.S- Rajagopal b-Aswatha c,† -K.N. Seetharamu d

[21] 2020: "Solar energy storage: The future of renewable energy" par I.M.Ibrahim, M.Gaber, and A.S.Ahmed. Renewable and Sustainable Energy Reviews 122: 109642.